

**SIMULACIÓN DE ALGORITMO HANDOFF VERTICAL BASADO EN  
PREFERENCIAS DE USUARIO MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE  
SOFTWARE LIBRE NCTUns**

**DIEGO FERNANDO BORRERO PARDO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2009**

**SIMULACIÓN DE ALGORITMO HANDOFF VERTICAL BASADO EN  
PREFERENCIAS DE USUARIO MEDIANTE LA HERRAMIENTA DE  
SOFTWARE LIBRE NCTUns**

**DIEGO FERNANDO BORRERO PARDO**

**Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Electrónico**

**Director  
ALEXANDER GARCIA DAVALOS  
Ingeniero de Sistemas  
Magister en Ciencias Computacionales**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
SANTIAGO DE CALI  
2009**

Nota de aceptación:

Aprobado por el Comité de Grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad Autónoma de Occidente para optar al título de Ingeniero Electrónico

---

Jurado

---

Jurado

Santiago de Cali, 6 de Noviembre de 2009

## **CONTENIDO**

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>GLOSARIO</b>   | <b>12</b>   |
| <b>RESUMEN</b>  | <b>15</b>   |
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>17</b>   |
| <b>1. DEFINICION DEL PROBLEMA</b>   | <b>18</b>   |
| <b>2. MARCO TEÓRICO</b>   | <b>19</b>   |
| <b>2.1. REDES HETEROGENEAS</b>  | <b>19</b>   |
| <b>2.2. TECNOLOGÍA DE RED GPRS</b>  | <b>20</b>   |
| <b>2.3. TECNOLOGÍA DE RED ETHERNET</b>  | <b>22</b>   |
| <b>2.4. TECNOLOGIA DE RED WI-FI</b>   | <b>24</b>   |
| <b>2.5. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN NTCUNS</b>  | <b>27</b>   |
| <b>2.6. ALGORITMOS BASADOS EN POLÍTICAS</b>   | <b>30</b>   |
| <b>2.7. ALGORITMO PARA LA SELECCIÓN DE LA INTERFAZ DE RED EN EL PROCESO DE HANDOFF VERTICAL EN REDES INALÁMBRICAS WLAN/WWAN</b> | <b>32</b>   |
| <b>3. ANTECEDENTES</b>  | <b>33</b>   |
| <b>4. OBJETIVOS</b>   | <b>35</b>   |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>4.1. OBJETIVO GENERAL</b>  | <b>35</b> |
| <b>4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>   | <b>35</b> |
| <b>5. JUSTIFICACIÓN</b>   | <b>36</b> |
| <b>6. SIMULACION DE UN ALGORITMO DE HANDOFF VERTICAL CON PREFERENCIAS DE USUARIO</b>              | <b>37</b> |
| <b>6.1. CONFIGURACION Y PUESTA A PUNTO E LA HERRAMIENTA DE SIMULACION</b>                         | <b>37</b> |
| 6.1.1. Requerimientos básicos.  | 37        |
| 6.1.2. Instalación de nctuns  | 38        |
| 6.1.3. Pruebas de simulación  | 41        |
| 6.1.4. Resultados   | 44        |
| 6.1.5. Errores presentados  | 45        |
| <b>6.2. IMPLEMENTACION DE LAS REES INALAMBRICAS (WLAN Y WWAN) EN LA HERRAMIENTA DE SIMULACION</b> | <b>45</b> |
| 6.2.1. Configuración y simulación de una red wi-fi  | 45        |
| 6.2.1.1. Configuración de parámetros  | 47        |
| 6.2.1.2. Análisis de resultados   | 48        |
| 6.2.2. Configuración y simulación de una red gprs   | 52        |
| 6.2.2.1. Análisis de resultados   | 58        |

|   |            |
|---|------------|
| <b>6.2.3. Configuración y simulación del super nodo en redes wi-fi y gprs</b> | <b>59</b>  |
| <b>6.2.3.1. Configuración de parámetros</b>                                   | <b>60</b>  |
| <b>6.2.3.2. Análisis de resultados</b>  | <b>62</b>  |
| <b>6.3.IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE HANDOFF VERTICAL</b>                   | <b>63</b>  |
| <b>6.3.1. Función de costo</b>  | <b>64</b>  |
| <b>6.3.2. Extracción de parámetros en nctuns</b>                              | <b>65</b>  |
| <b>6.3.2.1. Ancho de banda</b>  | <b>66</b>  |
| <b>6.3.2.1.1. Ancho de banda en wi-fi</b>                                     | <b>66</b>  |
| <b>6.3.2.1.2. Ancho de banda gprs</b>   | <b>68</b>  |
| <b>6.3.2.2. Consumo de energía</b>  | <b>69</b>  |
| <b>6.3.2.2.1. Modelo de consumo de energía en wi-fi</b>                       | <b>70</b>  |
| <b>6.3.2.2.2. Modelo de consumo de energía en gprs</b>                        | <b>74</b>  |
| <b>6.3.2.3. Costo económico</b>   | <b>78</b>  |
| <b>6.3.3. Algoritmo de handoff vertical con preferencias de usuario</b>       | <b>81</b>  |
| <b>6.3.4. Configuración de topología para validación.</b>                     | <b>86</b>  |
| <b>6.4.PRUEBA Y VALIDACION DE AMBIENTE SIMULADO</b>                           | <b>92</b>  |
| <b>7. CONCLUSIONES</b>  | <b>101</b> |
| <b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>  | <b>103</b> |



## LISTA DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Tabla 1. Estándares físicos 802.11</b>                      | <b>24</b>   |
| <b>Tabla 2. Capa física y capa de enlace de datos de WI-FI</b> | <b>25</b>   |
| <b>Tabla 3. Generadores de tráfico de NCTUns</b>               | <b>42</b>   |
| <b>Tabla 4. Tramas de gestión 802.11b en NCTUns</b>            | <b>50</b>   |
| <b>Tabla 5. Descripción del trazador de paquetes de GPRS</b>   | <b>57</b>   |
| <b>Tabla 6. Configuraciones para módulo Wphy</b>               | <b>66</b>   |
| <b>Tabla 7. API's de NCTUns</b>                                | <b>72</b>   |
| <b>Tabla 8. Tarifas descarga Kbits/s GPRS</b>                  | <b>78</b>   |
| <b>Tabla 9. Comandos para ejecución de servidor.c</b>          | <b>90</b>   |
| <b>Tabla 10. Resultados Función de costo primer envío</b>      | <b>94</b>   |
| <b>Tabla 11. Resultados Función de costo primer traspaso</b>   | <b>98</b>   |
| <b>Tabla 12. Traspaso hacia red GPRS</b>                       | <b>99</b>   |



## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág.      |
|--|-----------|
| <b>Figura 1. Metodología de simulación de NCTUns</b>                     | <b>28</b> |
| <b>Figura 2. Clasificación del handoff</b>                               | <b>31</b> |
| <b>Figura 3. Inicio de NCTUns</b>  | <b>40</b> |
| <b>Figura 4. Configuración de usuario NCTUns</b>                         | <b>40</b> |
| <b>Figura 6. Configuración Host 1</b>                                    | <b>43</b> |
| <b>Figura 7. Configuración de host destino</b>                           | <b>44</b> |
| <b>Figura 8. Curvas de rendimiento paquetes que salen de nodos 1 y 2</b> | <b>44</b> |
| <b>Figura 9. Topología Wi-Fi</b>   | <b>46</b> |
| <b>Figura 10. Configuración generador de tráfico</b>                     | <b>47</b> |
| <b>Figura 11. Configuración de receptor</b>                              | <b>48</b> |
| <b>Figura 12. Trazador de paquetes</b>                                   | <b>49</b> |
| <b>Figura 13. Curva de rendimiento red Wi-Fi</b>                         | <b>51</b> |
| <b>Figura 14. Itinerancia en infraestructura</b>                         | <b>52</b> |
| <b>Figura 15. Topología de red GPRS</b>                                  | <b>53</b> |
| <b>Figura 16. Configuración de Estación Base</b>                         | <b>55</b> |
| <b>Figura 17. Configuración teléfono GPRS</b>                            | <b>55</b> |
| <b>Figura 18. Trazador de paquetes de NCTUns</b>                         | <b>56</b> |
| <b>Figura 19. Curva de rendimiento recepción de paquetes en GPRS</b>     | <b>58</b> |
| <b>Figura 20. Selección de interfaces en súper nodo</b>                  | <b>60</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 21. Topología de red heterogénea, Wi-Fi y GPRS</b>                    | <b>61</b> |
| <b>Figura 22. Tráfico de datos en Wi-Fi</b>                                     | <b>62</b> |
| <b>Figura 23. Pila de protocolos de tecnología Wi-Fi</b>                        | <b>74</b> |
| <b>Figura 24. Diagrama de flujo de algoritmo de handoff vertical</b>            | <b>81</b> |
| <b>Figura 25. Topología de red heterogénea</b>                                  | <b>88</b> |
| <b>Figura 26. Wphy súper nodo</b>   | <b>89</b> |
| <b>Figura 27. Configuración de vho</b>  | <b>89</b> |
| <b>Figura 28. Llamado a servidor.c en el interfaz de red Wi-Fi en el nodo 7</b> | <b>90</b> |
| <b>Figura 29. System Command</b>  | <b>91</b> |
| <b>Figura 30. Primera transmisión</b>   | <b>94</b> |
| <b>Figura 31. Traspaso a GPRS</b>   | <b>97</b> |
| <b>Figura 32. Segundo traspaso</b>  | <b>98</b> |

## **LISTA DE ANEXOS**

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| <b>Anexo A. Algoritmo de handoff vertical en lenguaje C++ (vho.c)</b>                                      | <b>107</b>  |
| <b>Anexo B. Algoritmo en lenguaje C++ de servidor.c</b>  | <b>117</b>  |
| <b>Anexo C. Diagrama de flujo algoritmo de handoff vertical Trabajo de Oscar Wilfredo Jiménez Chavarro</b> | <b>120</b>  |

## GLOSARIO

**3G:** telefonía móvil de tercera generación que asocia los servicios de transferencia de voz y datos, a velocidades por encima de los 3 Mbits/s por usuario móvil

**4G:** telefonía móvil de cuarta generación basada totalmente en IP, que alcanza velocidades entre 100 Mbits/s por usuario en movimiento y 1 Mbits/s por usuario en reposo

**ACCESS POINT:** punto de acceso inalámbrico.

**API:** interfaz de programación de aplicaciones.

**BTS:** estación base transceptora.

**BSSID:** Basic Service Set Identifier – Identificador de conjunto básico de servicios.

**CDMA:** acceso múltiple por división de código.

**CORTAFUEGOS:** es una parte de un sistema o una red que está diseñado para bloquear el acceso no autorizado.

**CSMA/CD:** acceso múltiple por sensado de portadora con detección de colisiones.

**DWELL TIMER:** Temporizador utilizado para disminuir los traspasos innecesarios y garantizar la estabilidad del enlace con la red actual.

**GGSN:** nodo soporte de puerta de enlace.

**GPRS:** servicio general de paquetes vía radio.

**GSM:** sistema global para las comunicaciones móviles.

**GUI:** interfaz gráfico de usuario.

**HARDWARE:** todas las partes físicas de un computador.

**HOST:** Dispositivos usados por un usuario final, que proveen y/o utilizan servicios de red, tal como un dispositivo de escritorio o un móvil.

**ID:** identificador alfanumérico interno único para cada computador.

**IDLE:** inactividad de un usuario.

**IEEE:** Institute of Electrical and Electronics Engineers – Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos.

**IPTABLES:** herramienta de espacio de usuario mediante la cual el administrador puede definir políticas de filtrado del tráfico que circula por la red.

**KERNEL:** núcleo, es la parte fundamental de un sistema operativo.

**MAC:** (Medium Access Control – Control de acceso al medio) es el conjunto de mecanismos y protocolos por los que varios dispositivos en una red se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común.

**MS:** estación móvil.

**MULTICAST:** multidifusión.

**NIC:** tarjeta interfaz de red.

**NODO:** es un punto de conexión, ya sea de redistribución o de destino, para la transmisión de datos.

**OSI:** modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos.

**PARTICIONAMIENTO:** partición de disco.

**PDP:** protocolo de paquete de datos en GPRS.

**QoS:** calidad de servicios, es la capacidad de dar un buen servicio.

**ROOT:** nombre convencional de la cuenta de usuario que posee todos los derechos de administrador.

**SGSN:** nodos de soporte de servicios GPRS.

**SOFTWARE:** conjunto de los componentes lógicos necesarios para hacer posible la realización de una tarea específica en un computador.

**SSID:** (**S**ervice **S**et **I**Dentifier) es un código incluido en todos los paquetes de una red inalámbrica (Wi-Fi) para identificarlos como parte de esa red. El código consiste en un máximo de 32 caracteres alfanuméricos. Todos los dispositivos inalámbricos que intentan comunicarse entre sí deben compartir el mismo SSID.

**STANDBY:** consumo en espera de diferentes aparatos electrónicos.

**TCP:** protocolo de control de transmisión.

**TERMINAL:** consola de comandos de Linux.

**TOPOLOGIA:** forma de interconexión de los nodos de una red.

**FAILOVER:** capacidad de cambiar automáticamente hacia un servidor redundante o inactivo servidor, sistema o red, al momento de presentarse una falla o terminación anormal de la aplicación previamente activa.

**TXT:** formato para los archivos de texto.

**WAP:** punto de acceso inalámbrico.

**WI-FI:** sistema de envío de datos sobre redes computacionales que utiliza ondas de radio en lugar de cables que hace referencia al estándar IEEE 802.11

**WI-MAX:** interoperabilidad mundial para acceso por microondas.

**X.25:** estándar para redes de área amplia de conmutación de paquetes, que Establece mecanismos de direccionamiento entre usuarios, negociación de características de comunicación, técnicas de recuperación de errores.

## RESUMEN

En el proceso evolutivo de las actividades productivas y culturales del hombre, los sistemas de telecomunicación con tecnología inalámbrica han jugado un papel importante en el ámbito del intercambio de información, aportando movilidad, permitiendo transmitir y recibir información en tiempo real en cualquier lugar, aportando en facilidad de instalación, al no usar cables evitando obras de infraestructura y reduciendo el tiempo de instalación; y aportando en flexibilidad, pues pueden llegar donde cable no es pertinente. Estas características suponen mayor productividad y posibilidades de servicio, reduciendo los costos de instalación y ampliando los alcances de cobertura.

Dos ejemplos de utilización de tecnologías inalámbricas para el desarrollo, se aplican diariamente al emplear el servicio general de paquetes vía radio (GPRS) o las redes inalámbricas de área local de alta fidelidad (Wi-Fi).

La idea de vincular estas tecnologías WWAN y WLAN, dio paso al desarrollo de métodos que permiten enlazar nodos a varias y diferentes redes, manteniendo la comunicación entre usuario y servidor sin importar la tecnología inalámbrica de red que usen, uno de esos métodos se conoce como Handoff vertical y horizontal.

El presente trabajo, contempla la simulación mediante software de entornos que ostentan características de las tecnologías de red anteriormente mencionadas, redes WLAN y WWAN. Se experimenta con estas tecnologías de red de manera individual, para comprobar el buen funcionamiento de la herramienta de software y luego alcanzar una simulación apropiada, donde se combinan las tecnologías de red mencionadas. La simulación se efectúa con el propósito de recrear un ambiente de redes heterogéneas, usando un nodo multi-interfaz que permite el funcionamiento de las interfaces de radio enlace para redes Wi-Fi y GPRS respectivamente.

La finalidad con esta experimentación es la de explorar el funcionamiento de la herramienta de software NCTUns aplicada a redes inalámbricas heterogéneas que permitan el Handoff vertical, e identificar el procedimiento para poner a punto esta

herramienta y luego poder utilizarla en la simulación del **Algoritmo Para la Selección de la Interfaz de Red en el Proceso de Handoff Vertical en Redes Inalámbricas**, diseñado e implementado en el proyecto de investigación **“Desarrollo de un sistema universal para clientes con dispositivos móviles que permita portabilidad entre redes Wi-Fi / GSM-GPRS / CDMA2000 / WiMAX”**.

Para simular el algoritmo mencionado, se extrajo del mismo la función de costo creada por el ingeniero Oscar Wilfredo Jiménez Chavarro, la cual luego fue codificada en lenguaje C e incluida junto con un generador de tráfico creado exclusivamente para este proyecto, en un programa que ejecuta todo el proceso de handoff vertical en el software para la simulación de redes NCTUns.

Luego se verifica el funcionamiento del algoritmo de handoff vertical sobre una topología de red inalámbrica heterogénea, efectuando la simulación de éste, en un ambiente cambiante donde los parámetros involucrados en la decisión tomada por el algoritmo (consumo de energía, ancho de banda, costo económico), varían según las condiciones de la red.



## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de las tecnologías inalámbricas ha generado en los últimos años grandes cambios respecto a la comunicación entre usuarios y al desarrollo de las diferentes infraestructuras de red dentro de una empresa o un entorno determinado. Actualmente, las redes inalámbricas constituyen una eficaz y poderosa herramienta que permite el envío de voz, datos y video, sin necesidad de cables para establecer la comunicación, dando como valor agregado la movilidad y la flexibilidad del sistema en general.

Uno de los factores más importantes que se busca al transferir información o al establecer una comunicación es poder mantener la conexión obteniendo siempre la mejor calidad de servicio teniendo en cuenta la movilidad y el mejor rendimiento de la red.

Aunque estas tecnologías inalámbricas facilitan el intercambio de información entre los usuarios, todavía están en desarrollo y deben resolver varios obstáculos técnicos, lo cual no ha sido un problema para que este tipo de redes sean utilizadas de manera general y masiva en la actualidad.

Un problema a resolver dentro de la comunicación inalámbrica es poder realizar el traspaso (handoff o handover) a los diferentes tipos de redes inalámbricas disponibles, en el momento de realizar una conexión, utilizando dispositivos móviles dotados de múltiples interfaces de red, ya sea utilizando tecnologías como GSM/GPRS, UMTS, WI-MAX y Wi-Fi, y sin que el usuario y sus aplicaciones sean afectados.

Las posibles soluciones a dicho problema pueden probarse a través de una simulación lógica, la cual por medio de la representación de un entorno de redes inalámbricas permita analizar y entender las diferentes características y parámetros que se van a tener en cuenta para permitir el cambio de una red (handoff) a otra sin una posible desconexión. Es decir, por medio de un entorno de

simulación de redes inalámbricas, controlar las variables que hagan posible el proceso de traspaso o handoff entre redes.

## 1. DEFINICION DEL PROBLEMA

El Handoff o traspaso puede ser definido como la transición de la transmisión de una señal entre diferentes celdas<sup>1</sup> (access point/radio-estaciones base). Los esquemas de Handoff pretenden preservar la conectividad de los dispositivos con las redes que se encuentran alrededor, así como acortar el ruido que se puede presentar en la transferencia de señal. Lo cual permite clasificar el Handoff (o handover) en vertical y horizontal, según la tecnología de red a la cual se realice el traspaso.

El Handoff Vertical se considera como el proceso de Handoff realizado por un terminal móvil, a través de un punto Acceso (*Access Point* - AP) que soporta diferentes tecnologías de red. Por ejemplo, un computador portátil bien equipado puede ser capaz de utilizar al mismo tiempo, una LAN inalámbrica de alta velocidad y una tecnología celular para el acceso a Internet. La conexión de LAN inalámbrica proporciona generalmente velocidades más altas, mientras que las tecnologías celulares proporcionan una cobertura más ubicua (alta movilidad). Así el usuario del computador portátil puede utilizar una conexión de LAN inalámbrica siempre y cuando haya una disponible, y "*failover*" (invocar un sistema secundario cuando el primero falle) encima de una conexión celular cuando la LAN inalámbrica sea inasequible. El handoff vertical realiza el *failover* automático desde una tecnología a otra para mantener la comunicación. Este cambio de tecnología es la principal diferencia presente entre el Handoff Vertical y el Handoff Horizontal.

En el proceso de lograr la implementación física y probar de manera real un algoritmo que permita realizar el proceso de Handoff Vertical no es fácil contar con el apoyo de los diferentes operadores que ofrecen el servicio de conexión

---

<sup>1</sup> GATTINE, kara. Mobile computing definitions [en línea]: handoff. needham: thechtarget, 2009 [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: [http://searchmobilecomputing.techtarget.com/sDefinition/0,,sid40\\_gci335123,00.html](http://searchmobilecomputing.techtarget.com/sDefinition/0,,sid40_gci335123,00.html).

inalámbrica, por lo cual no es posible probar con certeza si su funcionamiento es efectivo para dispositivos con soporte a múltiples redes inalámbricas. Por esta razón, se hace necesario realizar las pruebas del funcionamiento de dicho algoritmo dentro de un ambiente simulado de manera lógica. Llevándonos a preguntarnos lo siguiente: ***¿Cómo simular de manera lógica redes heterogéneas y un algoritmo para el traspaso vertical (Handoff Vertical)?***

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. REDES HETEROGENEAS

El concepto de redes heterogéneas es usado, en el contexto de las redes inalámbricas, para describir el uso y combinación entre redes de diferentes tecnologías, en el proceso de comunicación bajo un área geográfica determinada. También involucra una variedad de sistemas y hardware para cada tipo de tecnología.

Actualmente, se puede encontrar una diversidad de tecnologías que difieren en sus capacidades de cobertura y ancho de banda, QoS, etc. tecnologías de red que se clasifican de la siguiente manera:

- Red inalámbrica de área personal (WPAN), son conocidas por su limitada área de cobertura, soportan transferencias de datos variables que van desde los Kilobit por segundo hasta centenares de Megabit por segundo. Este tipo de red se usa generalmente para enlazar dispositivos periféricos (impresoras, teléfonos móviles, electrodomésticos, etc.) sin conexión por cables<sup>2</sup>. Los principales estándares para este tipo de redes son conocidos como Bluetooth y Zigbee.

---

<sup>2</sup> WPAN (Wireless Personal Area Network) [en línea]: Tunez. Communitic International, 2008 [consultado 29 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://es.kioskea.net/contents/wireless/wpan.php3>

- Red inalámbrica de área local (WLAN), este tipo de redes posee una cobertura más amplia alrededor de unos cientos de metros. Está pensada para entornos de trabajo como oficinas, colegios, etc. Permitiendo a múltiples usuarios compartir una conexión a internet<sup>3</sup>. Como referencia de este tipo de tecnología podemos encontrar a los estándares como Hiperlan, HomeRF, Mesh, IEEE802.11.
- Red inalámbrica de área metropolitana (WMAN), este tipo de redes tiene una amplia cobertura geográfica alrededor de 50 Km, su capacidad de transferencia es alta. Como estándar encontramos Wimax.
- Red inalámbrica de área amplia (WWAN), en este tipo de redes que tienen el alcance más amplio de todas las redes inalámbricas, se encuentran las redes celulares en sus diferentes tecnologías GSM, GPRS, CDMA, UMTS, etc. Esta tecnología es usada principalmente en las comunicaciones móviles de red celular para proveer servicios de conexión a nivel regional, nacional e incluso global, generalmente de forma remunerada<sup>4</sup>.

## 2.2. TECNOLOGÍA DE RED GPRS

GPRS es una tecnología inalámbrica de red de área extendida, que aumenta la capacidad de las redes GSM para la transmisión de paquetes<sup>5</sup>. Esta aplica principios de radio paquetes para transferir datos de usuario en un eficiente camino entre una estación móvil GSM y una red de datos externa. Los paquetes pueden ser directamente enrutados desde la estación móvil GPRS hacia la red conmutada. Redes basadas en el protocolo de internet (IP) y X.25 son soportadas en la versión corriente de GPRS<sup>6</sup>. El acceso al canal utilizado en GPRS se basa en divisiones de frecuencia sobre un dúplex y TDMA (acceso múltiple por división

---

<sup>3</sup> CHAPLIN, Kevin. Wireless LANs vs. Wireless WANs En: White Paper: Defining Wireless LANs and WANs. Noviembre, 2002, vol. 2130273. No. 1.0, p. 1-2.

<sup>4</sup> Wireless Wide Area Network [en línea]: San Diego. Wikimedia, 2009 [consultado 29 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_Wide\\_Area\\_Network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_Wide_Area_Network)

<sup>5</sup> BATES, Regis J. Broadband telecommunications handbook: VPNs, 3G Wireless, GPRS, MPLS, VoIP and SIP. 2 ed. United States of America: McGraw-Hill, 2002. 590.

<sup>6</sup> BETTSTETTER y VÖGEL, Hans-Jörg y EBERSPÄCHER, Jörg. GSM PHASE 2+ GENERAL PACKET RADIO SERVICE GPRS: architecture, protocols, and air interface. En: Surveys. IEEE communications, 1999, vol. 2, no. 3, p. 2-14.

de tiempo), permitiendo a los clientes solo usar la red cuando envíe o reciba un paquete de información. Todo el tiempo que esté inactivo podrá ser utilizado por otros usuarios para enviar y recibir información.

Cuando un móvil GPRS desea hacer uso de los recursos inalámbricos de la red correspondiente a su tecnología, explora (escanea) el entorno en busca de la señal más fuerte entre todas las que percibe, de las estaciones base a su alrededor. Una vez localizada, el nodo móvil selecciona la BTS con la señal más fuerte y envía una solicitud de asociación al SGSN conectada a esa BTS.

El SGSN antes de adjuntar el móvil GPRS a la red verifica, su información de suscripción (autorización), la identidad del móvil (autenticación), el nivel de QoS que requiere y si está disponible para brindarle el servicio sin afectar a los usuarios que ya están adjuntos.

Una vez adjunto, el SGSN inicia un registro de desplazamiento del dispositivo móvil para conocer su ubicación y, en el momento en que sea necesario, enrutarle paquetes.

Para poder transferir o recibir paquetes de datos, el móvil GPRS necesita activar una dirección PDP que luego es anclada al GGSN, presente en la conexión lógica recién establecida.

Un nodo móvil de red inalámbrica GPRS, presenta tres estados de funcionamiento según la situación actual del dispositivo.

- **El estado inactivo (IDLE).** En el estado inactivo, la estación móvil no tiene una conexión lógica activa ni una dirección de red asignada. El móvil GPRS sólo puede recibir paquetes multicast emitidos por las estaciones base. El dispositivo no puede ser accedido por la red para enrutarle paquetes de datos puesto que el SGSN no conoce la ubicación del móvil, ya que el nodo GPRS no realiza actualizaciones de ubicación en este estado. El proceso de asociación no se ha realizado. El móvil GPRS en el tiempo de estado inactivo escucha las

transmisiones desde las estaciones base vecinas y evalúa la calidad de la señal de cada una.

- **El estado Activo.** Se presenta cuando se efectúa un tráfico de paquetes entre la red GPRS y el nodo móvil después de completado el proceso de asociación a la red. El móvil GPRS informa a su SGSN cada movimiento de celda<sup>7</sup> presente en su desplazamiento; esto se conoce como actualización a nivel de celda. En este estado una conexión lógica se halla activa con una dirección de red PDP anclada al GGSN presente en el enlace.

- **El estado StandBy.** En el momento en que expira el tiempo de estado activo debido a la ausencia del tráfico de paquetes, el nodo móvil GPRS entra en estado de StandBy, a la espera de que se reanude el envío y recepción de paquetes de datos en la red. En este estado, la actualización de localización se hace a nivel de área de enrutamiento<sup>8</sup> y se mantiene la conexión lógica entre el SGSN, el GGSN y el móvil GPRS.

### 2.3. TECNOLOGÍA DE RED ETHERNET

Ethernet (también conocido como *estándar IEEE 802.3*) es un estándar de transmisión de datos para redes de área local que opera en las dos capas inferiores del modelo OSI: la capa de enlace de datos y la capa física. El modelo de referencia de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI), ofrece una referencia sobre con qué puede relacionarse Ethernet, pero en realidad se implementa sólo en la mitad inferior de la capa de Enlace de datos, que se conoce como subcapa Control de acceso al medio (Media Access Control, MAC), y la capa física.

Ethernet en la Capa 1 implica señales, streams de bits que se transportan en los medios, componentes físicos que transmiten las señales a los medios y distintas topologías. La Capa 1 de Ethernet tiene un papel clave en la comunicación que se produce entre los dispositivos, pero cada una de estas funciones tiene limitaciones

---

<sup>7</sup> Las celdas representan el área de cobertura de la estación base.

<sup>8</sup> El área de enrutamiento es la agrupación de varias celdas vecinas.

tales como, no poder comunicarse con las capas superiores, no poder identificar los dispositivos, no poder identificar la fuente de la transmisión cuando transmiten múltiples dispositivos, entre otras. Ethernet en la Capa 2 se ocupa de estas limitaciones<sup>9</sup>.

Ethernet separa las funciones de la capa de Enlace de datos en dos subcapas diferenciadas: la subcapa control de enlace lógico (LLC) y la subcapa control de acceso al medio (MAC). La subcapa de enlace de datos contribuye significativamente a la compatibilidad de tecnología y la comunicación con la computadora<sup>10</sup>. La subcapa MAC se ocupa de los componentes físicos que se utilizarán para comunicar la información y prepara los datos para transmitirlos a través de los medios<sup>11</sup>.

Ethernet ofrece un método para determinar cómo comparten los nodos el acceso al medio conocido como Acceso múltiple con detección de portadora con detección de colisiones (CSMA/CD). Este método que solo se aplica para redes locales, obliga a los host de la red que tienen un mensaje para enviar a escuchar antes de transmitir. Si un dispositivo detecta la señal de otro dispositivo, espera durante un periodo especificado antes de transmitir. Cuando no se detecte tráfico, un dispositivo transmitirá su mensaje. Mientras se lleva a cabo la transmisión, el dispositivo continúa escuchando para detectar tráfico o colisiones en la LAN. Una vez que se envía el mensaje, el dispositivo regresa a su modo de escucha predeterminado.

Cuando se produce una colisión, todos los dispositivos transmisores continuarán transmitiendo para garantizar que todos los dispositivos de la red detecten la colisión y envíen una señal de congestión para notificar a los demás dispositivos sobre una colisión, de manera que éstos invocarán un algoritmo de postergación que hace que todos los dispositivos dejen de transmitir durante un período aleatorio, lo que permite que las señales de colisión disminuyan.

---

<sup>9</sup> CCNA Exploration, aspectos básicos de networking [CD-ROM]. Washington: CISCO System, 2009

<sup>10</sup> Delimitación de trama, direccionamiento y detección de errores.

<sup>11</sup> Controla la colocación de tramas en los medios y el retiro de tramas de los medios, esto incluye el inicio de la transmisión de tramas y la recuperación por fallo de transmisión debido a colisiones.

## 2.4. TECNOLOGIA DE RED WI-FI

Comúnmente denominada 802.11, se trata de un estándar internacional de la IEEE que define las características de comunicación entre dispositivos que transmiten información por medio inalámbrico en una red de LAN (Local Area Network), el cual se aplica sobre las dos capas mas bajas del modelo OSI, la capa física y la capa de enlace.

Actualmente existen 11 modificaciones del estándar original 802.11, pero las que presentan cambios en velocidad y frecuencias de transmisión son aquellas que normalmente se conocen como estándares físicos de 802.11 mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1. Estándares físicos 802.11**

| Estándar         | Frecuencia | Velocidad | Rango |
|------------------|------------|-----------|-------|
| WiFi a (802.11a) | 5 GHz      | 54 Mbit/s | 10 m  |
| WiFi B (802.11b) | 2,4 GHz    | 11 Mbit/s | 100 m |
| WiFi G (802.11g) | 2,4 GHz    | 54 Mbit/s | 100 m |

**Fuente:** Introducción a Wi-Fi (802.11 o WiFi) [en línea]: Tunes. Communitic International, 2008 [consultado 12 de enero de 2010]. Disponible en Internet: <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>

En la capa física, el estándar define la modulación de las ondas de radio y las características de señalización para la transmisión de datos. Presenta tres técnicas que establecen modos de transmisión alternativos, (ver Tabla 2). Las técnicas de espectro ensanchado incrementan la fiabilidad, aumentan el rendimiento y permite a muchos productos no relacionados compartir el espectro sin una cooperación específica y con una interferencia mínima. El estándar inalámbrico original 802.11 define tasas de transmisión entre 1 y 2 Mbps vía ondas de radio. Usando estas técnicas de espectro ensanchado, la banda de 2.4 GHz es dividida en 75 sub-canales<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> IEEE 802.11b Wireless LANs Wireless Freedom at Ethernet Speeds. Santa Clara, CA 2003. 1 archivo de computador.



**Tabla 2. Capa física y capa de enlace de datos de WI-FI**

|  |                    |                    |            |
|--|--------------------|--------------------|------------|
| <b>Capa de enlace de datos<br/>(MAC)</b> | 802.2              |                    |            |
|  | 802.11             |                    |            |
| <b>Capa física<br/>(PHY)</b>             | DSSS <sup>13</sup> | FHSS <sup>14</sup> | Infrarrojo |

**Fuente:** Introducción a Wi-Fi (802.11 o WiFi) [en línea]: Tunez. Communitic International, 2008 [consultado 12 de enero de 2010]. Disponible en Internet: <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>

Cada vez que dos dispositivos de red se van a comunicar, estos se ponen de acuerdo en la técnica de espectro ensanchado a utilizar para que los mensajes sean enviados dentro de una secuencia sub-canales. Cada conversación dentro de la red 802.11 ocurre sobre diferentes patrones de salto que son designados para minimizar la posibilidad de que dos dispositivos fuente de mensajes, los envíen usando simultáneamente el mismo canal.

La capa de enlace de datos se divide en dos subcapas tal como sucede en Ethernet, subcapa LLC y subcapa MAC. Esta última es la que marca la diferencia entre las tecnologías de red 802.3 y 802.11.

La subcapa MAC incorpora un método de acceso a los medios denominado: acceso múltiple con detección de portadora y prevención de colisiones (CSMA/CA), diseñado para soportar múltiples usuarios sobre un medio compartido que obliga, a los dispositivos fuente de mensajes a censar el medio antes de acceder a el.

El protocolo CSMA/CA intenta evitar las colisiones usando una trama específico de reconocimiento (ACK), la cual es enviada por una estación receptora para confirmar que el paquete de datos fue recibido sin errores. Este método funciona

---

<sup>13</sup> Espectro ensanchado por secuencia directa

<sup>14</sup> Espectro ensanchado por saltos de frecuencia

de la siguiente manera: una estación que desea transmitir censa el aire para determinar si el medio esta ocupado. Si no detecta actividad, la estación espera un periodo de tiempo aleatorio adicional, seleccionado, para luego transmitir si el medio aun esta libre. Si el paquete es recibido sin errores, la estación receptora usa una trama ACK que notificar el arribo del paquete intacto, para completar el proceso. Si la trama ACK no es detectada por la estación transmisora, se asume que una colisión se hizo manifiesta, lo que causa la retransmisión del paquete después de esperar otra cantidad de tiempo aleatorio.

El estándar 802.11 define 2 modos de de trabajo: el modo infraestructura, donde la red inalámbrica consiste de al menos un punto de acceso conectado a una infraestructura de red cableada y un grupo de estaciones inalámbricas finales. Esta configuración es conocida como BSS (*Basic service set*). Y el modo ad hoc (también conocido como modo punto a punto o IBSS<sup>15</sup>), que es simplemente un grupo de estaciones inalámbricas 802.11 que se comunican directamente entre ellas sin usar un punto de acceso inalámbrico u otra conexión a la red cableada. Las estaciones inalámbricas en cada modo de trabajo, realizan una búsqueda (*scanning*) en la banda de frecuencia para identificar y seleccionar un AP en el caso de modo infraestructura, o inicializar una red ad-hoc en el caso de IBSS<sup>16</sup>. Esta búsqueda puede ser:

- Active Scan: en cada canal, se envía un mensaje de prueba *Probe request* y se espera respuesta, el AP envía una respuesta *Probe Response* y de este modo el terminal selecciona el mejor AP. Una vez hecho esto, el terminal envía un mensaje *Association Request* al AP seleccionado, y éste contesta con un *Association Response* indicando la aceptación o rechazo de la NIC inalámbrica del terminal.
- Passive Scan: el terminal 802.11 no envía ninguna trama *Probe request*, en cambio, esta espera en un canal por un periodo de tiempo escuchando todas las tramas *Beacon*, para sumar a su lista las BSSID que estas ofrecen.

---

<sup>15</sup> Independent Basic Service Set – Conjunto independiente de servicios básicos

<sup>16</sup> GÁLLEGO MARTÍNEZ, José Ramón, HERNÁNDEZ SOLANA, Ángela. Laboratorio de Telemática, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 2004. 1 archivo de computador.

## 2.5. HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN NTCUNS

Las herramientas de simulación, son aplicaciones de software que permiten modelar sistemas reales, para imitar su funcionamiento a partir de supuestos, expresados a través de relaciones lógicas y matemáticas, con el objetivo de observar el comportamiento de este sistema, para obtener información pertinente que facilite predecir hechos futuros, entrenar al usuario, mejorar la comprensión de éste y apoyarlo en la toma de decisiones, todo con respecto al sistema que se encuentra bajo observación<sup>17</sup>.

NCTUns (*National Chiao Tung University, Network Simulator*) es un simulador y emulador de redes y sistemas de telecomunicaciones avanzado. Es un software libre que se ejecuta sobre la plataforma Linux, utiliza una metodología de simulación que modifica el kernel de Linux, lo cual hace que los resultados obtenidos en la simulación sean más precisos que en otros simuladores.

Este simulador permite desarrollar, evaluar y diagnosticar el desempeño de protocolos y aplicaciones para diferentes tipos de redes (LAN, WAN, MAN). Las simulaciones hechas con esta herramienta cuentan con la particularidad de poder simular en tiempo real y con interfaces similares a la de los sistemas reales, lo cual permite familiarizar más al usuario con el manejo del diseño, configuración e implementación de aplicaciones en redes.

NCTUns utiliza una sintaxis sencilla, pero muy efectiva para describir la topología, los parámetros y la configuración de una simulación. Esta descripción se genera a partir de la interfaz gráfica del usuario<sup>18</sup>.

Este programa permite la simulación de arquitecturas de redes sencillas, sin embargo, su mayor potencial está en la simulación de redes tan complejas como las redes GPRS, satelitales y ópticas.

---

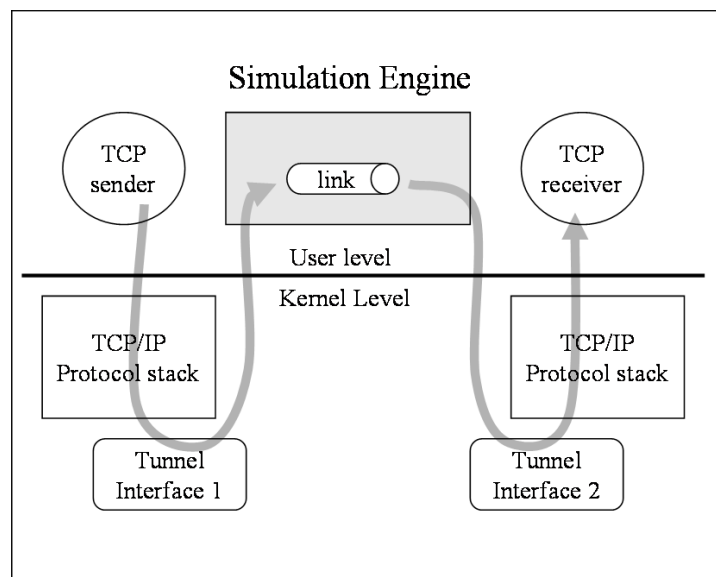
<sup>17</sup> WANG, Shie-Yuan; LIAO, Kuo-Chiang. Innovative network emulations using the nctuns tool. Taiwan 2006.

<sup>18</sup> WANG, Shie-Yuan, CHOU, Chih-Liang, LIN, Chih-Che and HUANG, Chih-Hua. The protocol developer manual for the nctuns 5.0 network simulator and emulator. Taiwan, 2008

Tiene la posibilidad de emular un dispositivo de red del mundo real en su entorno gráfico e interconectarlo con dispositivos simulados o virtuales, para intercambiar paquetes, especialmente para redes móviles e inalámbricas; para dichas aplicaciones provee recursos para manejo y estudio de sistemas de radiofrecuencia y permite obtener mediciones para establecer niveles de calidad de servicio (QoS) de las señales irradiadas. Permite definir obstáculos, trayectorias de movimiento y que los terminales móviles (como celulares GPRS y portátiles) se puedan desplazar siguiendo dicha trayectoria, al mismo tiempo en que se hacen mediciones de atenuación, interferencia y de ancho de banda.

Está basado en una novedosa metodología de simulación de re-entrada al kernel que permite utilizar la pila de protocolos real existente en Linux para generar resultados TCP/IP de alta fidelidad en la simulación de redes. La Figura 1 explica el concepto.

**Figura 1. Metodología de simulación de NCTUns**



**Fuente:** WANG, Shie-Yuan, CHOU, Chih-Liang, LIN, Chih-Che and HUANG, Chih-Hua. The protocol developer manual for the nctuns 5.0 network simulator and emulator. Taiwan, 2008.

En la Figura 1 el TCP *sender* envía un paquete hacia el interior del kernel, el cual atraviesa la pila de protocolos del mismo, tal como lo haría un paquete Ethernet.

Ante la configuración de la interfaz 1 como el dispositivo de salida, el paquete se inserta en la cola de salida del túnel del interfaz. El motor de simulación inmediatamente lo detecta como un evento y emite un llamado al sistema de lectura para alcanzar este paquete. Después de experimentar la simulación de los retrasos de transmisión y los retrasos de propagación del enlace, el motor de simulación emite un llamado al sistema de escritura para colocar el paquete en la cola de entrada del túnel de la interfaz 2.

El kernel luego causará una interrupción de software y pondrá el paquete en la pila de protocolos TCP/IP. Enseguida, el paquete será puesto en la cola de recepción del socket que el TCP *receiver* crea. Finalmente, el TCP *receiver* usará el sistema de lectura para sacar el paquete del kernel.

Nótese que el paquete enviado por el TCP *sender* en la Figura 1 pasa a través del kernel dos veces. Esta propiedad es característica de la metodología de simulación de re-entrada.

Al entrar varias veces al kernel, se crea la ilusión de que el paquete pasa a través de varios y diferentes hosts cuando en realidad el paquete no ha salido de la máquina en la cual se corre el software.

Sin embargo, las tareas de simulación realizadas por el software son secuenciales. Los protocolos aplicados en la herramienta se ejecutan de manera global en la simulación y no en cada dispositivo, siguiendo un orden secuencial determinado por el programador de tareas propio de NCTUns, el cual es independiente del programador de tareas del sistema operativo donde se ejecutar la herramienta.

## 2.6. ALGORITMOS BASADOS EN POLÍTICAS

La gestión de traspaso (handoff o handover) es una operación fundamental en cualquier sistema de redes inalámbricas, que permite a la red mantener conexiones activas con un terminal móvil que se desplaza o balancea su carga de tráfico de red entre diferentes aéreas de cobertura. El proceso de traspaso se puede dividir en tres etapas:

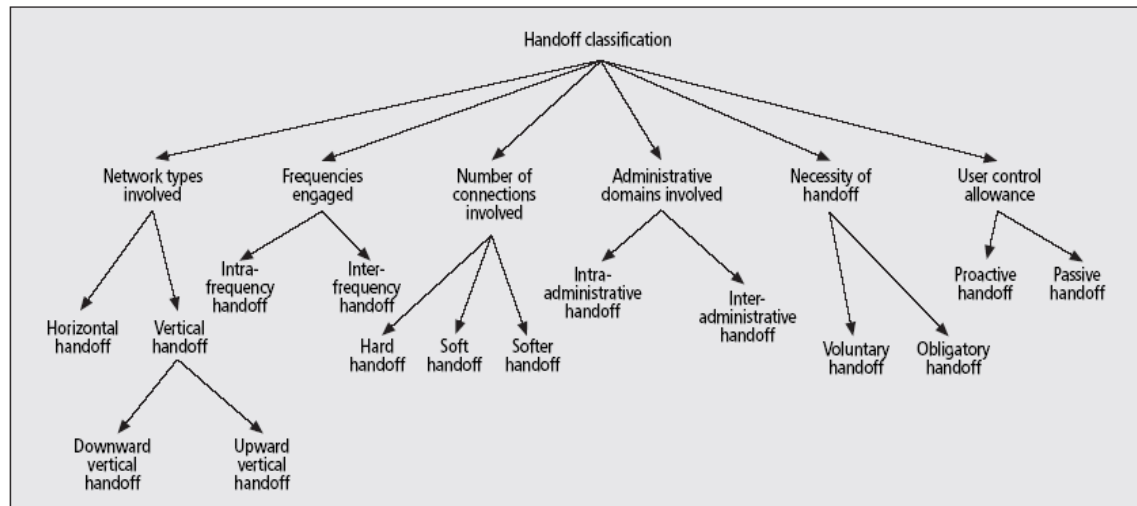
- etapa de iniciación, que es la responsable de dar comienzo al traspaso de acuerdo a las condiciones específicas, tales como la reducción de la señal de radio o la congestión de red.
- etapa de preparación del traspaso, que consiste en seleccionar el mejor punto de acceso inalámbrico de acuerdo con varios parámetros (la potencia de la señal, el ancho de banda, recursos disponibles, entre otros).
- etapa de ejecución del traspaso, que requiere el intercambio de señalización para restablecer la comunicación y re-enrutar a través del nuevo camino seleccionado.

El Handoff se puede clasificar de varias formas, pero entre los criterios más importantes de clasificación se encuentran: el tipo de redes relacionadas, que depende de si el traspaso se hizo entre redes de la misma tecnología o redes de diferentes tecnologías. Número de conexiones activas, que es un criterio que relaciona la capacidad que tiene la gestión de traspaso de preservar la calidad de la comunicación durante el traspaso del terminal móvil. Por último, la cantidad de dominios administrativos, donde se integra el criterio del traspaso sobre redes con dominios administrativos<sup>19</sup>, sin importar la tecnología. La Figura 2 presenta una clasificación más detallada del handoff.

---

<sup>19</sup> Un dominio administrativo es un grupo de sistemas y redes operadas por una única organización con autoridad administrativa.

**Figura 2. Clasificación del handoff**



**Fuente:** Nidal Nasser, Ahmed Asúa y Hossan Hassanein. Handoff in Fourth Generation Heterogeneous Networks. En: Communications Magazine. Octubre, 2006, Vol. 44, no. 10, p 96-103.

Los primeros algoritmos que se utilizaron para tomar la decisión de realizar o no el Handoff, tomaban como referencia un solo parámetro, la potencia de la señal (RSS – *Received Signal Strength*); dejando por fuera métricas tales como el ancho de banda, el costo de la conexión, las preferencias del usuario y el consumo de la batería; haciendo inadecuada la decisión tomada por este algoritmo.

Los nuevos enfoques de los usuarios y de las aplicaciones, han generado la necesidad de usar esquemas basados en políticas que consideren el contexto, evolucionando a los algoritmos hacia dos nuevos criterios. El primero, se orienta a las variables o parámetros que se utilizan y el segundo, se orienta a las estrategias que se utilizan para procesar estos parámetros.

Un algoritmo basado en políticas, es el que representa el caso de estudio o validación dentro de este proyecto (Simulación De Algoritmo Handoff Vertical basado en preferencias de usuario mediante la herramienta de Software Libre NCTUns)

## **2.7. ALGORITMO PARA LA SELECCIÓN DE LA INTERFAZ DE RED EN EL PROCESO DE HANDOFF VERTICAL EN REDES INALÁMBRICAS WLAN/WWAN**

Este algoritmo diseñado por el Ingeniero Oscar Wilfredo Jiménez Chavarro<sup>20</sup>, es un desarrollo logrado como uno de los objetivos del proyecto de Cliente Universal desarrollado por tres grupos de investigación de diferentes universidades (UAO, ICESI y USACA), que se enfocó en resolver la diversidad que se presenta en las comunicaciones móviles, permitiéndole a los usuarios el acceso a un software que inter-opere con sus servicios por medio de un interfaz, el cual consigue establecer la conexión de una forma práctica, rápida y segura.

Este algoritmo tiene como finalidad permitir el traspaso entre redes inalámbricas heterogéneas para dispositivos móviles que cuenten con múltiples interfaces considerando las preferencias de usuario y su nivel de movilidad (alta, media, baja), para que el usuario móvil pueda tener acceso a diferentes redes inalámbricas de manera automatizada y semi-transparente.

Para el diseño del algoritmo se usaron métricas basadas en las condiciones de la red, dispositivo, operador (costo de conexión) y están condicionadas a las preferencias del usuario, es decir éste podrá qué criterio es más importante para seleccionar la red (p.ej. ancho de banda, costo de conexión, consumo de batería). En este sentido, la selección de la red inalámbrica podrá ser administrada por las preferencias de usuario y de acuerdo con sus necesidades y contexto de movilidad (alta, media, baja) en la cual esté actuando<sup>21</sup>.

En el anexo (C), se puede apreciar el diagrama de flujo del algoritmo original que se tomo como caso de estudio.

---

<sup>20</sup> Tesis: JIMÉNEZ CHAVARRO, Oscar Wilfredo. Algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de handoff vertical en redes inalámbricas WLAN / WWAN. Trabajo de grado Ingeniero Informático. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería, 2006. 58 p.

<sup>21</sup> MILLAN, Andrés Felipe, NAVARRO, Andrés, GARCIA, Alexander, ZUÑIGA, Claudia, CESPEDES, Sandra, SOLARTE, Zeida María, TAMURA, Gabriel, JIMENEZ, Oscar Wilfredo. Sistema universal para portabilidad de dispositivos móviles en un ambiente de redes inalámbricas heterogéneas. 1 ed. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. 256.



La ejecución del algoritmo se realizó efectuando los siguientes pasos: en el paso 1 se obtuvo la información sobre las redes disponibles, pesos, parámetros, contexto de movilidad; en el paso 2 se evaluaron las redes considerando el tipo y la movilidad asociada a cada tecnología, la función de costo correspondiente; en el paso 3 se procedió a realizar la selección de la interfaz de red a utilizar, considerando aquella que presenta un valor de costo menor. Para esta selección se tuvo en cuenta que cuando se comparen las redes con la red actual si el valor de costo de la nueva red es menor que el de la actual se lanzará un tiempo de estabilización (DWT) para verificar que las condiciones son estables para la red. Si durante este tiempo las condiciones no varían se selecciona como mejor opción la nueva red, en caso contrario se deja la red actual.

La implementación del prototipo del algoritmo se realizó sobre un dispositivo móvil inalámbrico tipo PDA, que sólo podía detectar y evaluar redes 802.11, puesto que no contaba con un interfaz de red WWAN. Las pruebas del algoritmo de handoff con este dispositivo, se realizaron bajo un ambiente homogéneo de redes WLAN, con el fin de comprobar el funcionamiento del algoritmo en un ambiente real y verificar su efectividad para el proceso de handoff.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios a pesar de que el ambiente de prueba, presentaba fluctuaciones considerables en sus niveles de potencia de transmisión, lo que propició que el proceso de selección de la interfaz de red no sugiriera otra red diferente a la que estaba en uso debido a la inestabilidad manifestada por las redes presentes.

### 3. ANTECEDENTES

El antecedente más notable que se puede citar es el proyecto UMA de NOKIA<sup>22</sup>, Acceso Móvil No Licenciado (*Unlicensed Mobile Access* - UMA), es una de las primeras iniciativas para estandarizar el traspaso (*handover*) transparente entre una red celular y una red inalámbrica de área local (WLAN), con la finalidad de ofrecer mayor cobertura y mejores servicios de valor agregado.

---

<sup>22</sup> Unlicensed mobile access (UMA) [en línea]: Estados Unidos. NOKIA, [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.nokia.co.uk/find-products/technologies/uma#What%20is%20UMA??>

Nokia presentó en el 2006 el teléfono Nokia 6136 con la tecnología UMA incluida, que permite a los operadores suministrar servicios de datos y voz a suscriptores sobre redes de acceso WLAN, aumentando de manera dramática la disponibilidad del servicio móvil mientras reduce los costos relacionados con el despliegue de la red. Los consumidores, a su vez, pueden hacer uso del servicio de llamadas de voz vía Internet usando acceso de radio WLAN.

Otro de los antecedentes para este proyecto es el estándar 802.21<sup>23</sup>, que hace parte de una familia de estándares para redes de área local y metropolitana desarrollados por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), con el cual se mantiene sin interrupción las conexiones del usuario durante las transiciones a través de diferentes redes.

IEEE 802.11k y 802.11r son los principales estándares del sector actualmente en desarrollo que permitirán transiciones de conjunto de Servicio Básico (*Basic Service Set* - BSS) en el ambiente LAN. El estándar IEEE 802.11k proporciona información para descubrir el mejor punto de acceso disponible. El IEEE 802.11r define mecanismos para transiciones rápidas y seguras entre los puntos de acceso con el mismo Conjunto de Servicio (*Extended Service Set* - ESS)<sup>24</sup>.

IEEE 802.21 define una función común de *Media Independent Handover* (MIH) entre la Capa 2 y 3 de Interconexión de Sistemas Abiertos (*Open Systems Interconnection* - OSI) de la pila de protocolos de red, que permite la movilidad a través de redes heterogéneas, proporcionando mecanismos para mejorar las transiciones a través de Wi-Fi, WiMAX y radios celulares.

La función MIH ayuda a mantener las conexiones del usuario, permite un excelente descubrimiento y selección de red, y puede conectar o desconectar las interfaces de red con base en la disponibilidad de la red para aumentar la duración de la batería en aparatos móviles.

---

<sup>23</sup> IEEE 802.21 [en línea]: Estados Unidos. IEEE 802, [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.ieee802.org/21/>

<sup>24</sup> Diseño de un "Backbone" inalámbrico utilizando tecnología WiMAX, para la integración de puntos de acceso WiFi de diferentes proveedores en el Distrito Metropolitano de Quito y propuesta para ofrecer multi-servicios. Trabajo de grado Ingeniero electrónico y de telecomunicaciones. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Escuela de ingeniería. 2006. 189 p.

El estándar es compatible con transiciones tanto para usuarios móviles como estacionarios. Para los usuarios móviles, las transiciones pueden ocurrir debido a un cambio en las condiciones del enlace inalámbrico o una pérdida de señal en la cobertura de radio debido al desplazamiento del cliente. Para los usuarios estacionarios, las transiciones pueden ocurrir cuando el ambiente alrededor del usuario cambia para hacer que una red sea más atractiva que la otra. En otro caso, el usuario puede elegir una aplicación como, por ejemplo, descargar un archivo muy grande de datos o de medios que puede necesitar *handover* para una red capaz de soportar una mayor velocidad de datos.

## **4. OBJETIVOS**

### **4.1. OBJETIVO GENERAL**

Simular un algoritmo de handoff vertical basado en preferencias del usuario, a través de la herramienta de software libre NCTUns.

### **4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar las características de la herramienta, del software libre para la simulación de redes inalámbricas.
- Implementar un ambiente simulado de redes inalámbricas WLAN y WAN usando la herramienta de software libre.
- Implementar el algoritmo de Handoff Vertical y validar su funcionamiento para el traspaso entre redes heterogéneas.

## 5. JUSTIFICACIÓN

Para la verificación del funcionamiento del Algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de Handoff Vertical en redes inalámbricas WLAN/WWAN, se presentan dos posibilidades. La primera, es en un ambiente real de pruebas donde se aplique el algoritmo en un dispositivo que cuente con dos interfaces de redes con diferentes tecnologías, una red WLAN y una GPRS, de las cuales no es posible hacer uso de la red GPRS debido a la negatividad de los operadores de la zona, que no permiten hacer pruebas sobre ésta.

La segunda opción y la más viable, es la de realizar las pruebas necesarias sobre un ambiente simulado, en el cual se puedan configurar diferentes redes de comunicación tales como redes WLAN y GPRS, para analizar los resultados. El proyecto se justifica porque, a través de la simulación del algoritmo de Handoff Vertical que se pretende implementar, se puede obtener información importante del desempeño de éste, corroborando la funcionalidad que se espera o identificando los problemas que puede presentar a la hora de aplicar el algoritmo sobre un dispositivo inalámbrico que accede a redes de diferentes tecnologías, permitiéndonos validar o no, el funcionamiento de este algoritmo.

Se hace uso del software de simulación y emulación NCTUns, ya que es un software libre, que permite desarrollar, evaluar y diagnosticar el desempeño de protocolos y aplicaciones para diferentes tipos de redes (LAN, WAN, MAN), presentando su mayor potencial en redes tan complejas como las redes GPRS. Además, cuenta con la particularidad de poder simular en tiempo real y con interfaces similares a la de los sistemas reales.

Se evidencias también que la versión NCTUns 5.0, no provee opciones para la simulación de algoritmos de handoff vertical, lo cual amplía el alcance del proyecto porque se plantea la posibilidad de generar una aplicación que habilite en esta herramienta de simulación el trabajo con handoff vertical para futuras investigaciones.

## 6. SIMULACION DE UN ALGORITMO DE HANDOFF VERTICAL CON PREFERENCIAS DE USUARIO

El desarrollo del proyecto se alcanzaron las siguientes etapas: configuración y puesta a punto de la herramienta de simulación, implementación de las redes inalámbricas (WLAN y WWAN) en la herramienta de simulación, implementación del algoritmo de Handoff Vertical y prueba y validación en el ambiente simulado.

### 6.1. CONFIGURACION Y PUESTA A PUNTO DE LA HERRAMIENTA DE SIMULACION

NCTUns fue el software de simulación seleccionado para el desarrollo de este proyecto, porque integra las configuraciones de redes GPRS y redes Wi-Fi como una de sus características más importantes. Presenta una barra de herramientas muy amplia con una gran variedad de dispositivos usuales para la estructuración de redes de telefonía celular y redes inalámbricas 802.11, las cuales son necesarias para realizar la experimentación con el algoritmo de Handoff vertical que se usó como caso de estudio en este proyecto.

**6.1.1. Requerimientos Básicos.** Para la instalación de NCTUns 5.0 los requerimientos de software y hardware son:

- **Sistema operativo**, Linux Red Hat, Fedora Core 9.0. Aunque también es posible usar otras distribuciones de Linux como Debian.
- **Mínimo en Hardware**, procesador Pentium de 1 GHz, 256 MB de memoria RAM y 200 MB de espacio libre en el disco.
- **Software**, tener instalado un compilador gcc, interfaz gráfica Gnome o KDE, y que el usuario posea los privilegios del administrador para el manejo del programa. Así mismo, que se tenga asignado en su perfil el shell bash/tcsh al usuario para el manejo por comandos en modo consola.

Se puede instalar Linux como único sistema operativo o compartir el disco duro con otro sistema operativo (p.e. Windows) realizando un particionamiento del disco duro, lo cual se puede lograr mediante un software especial como Partition Commander, PartitionMagic o utilizando el sistema de particionamiento provisto en el sistema operativo Linux al momento de instalar el mismo. Inmediatamente el sistema operativo esté funcionando adecuadamente, se procede a instalar NCTUns.

**6.1.2. Instalación de NCTUns.** Para la instalación del software se siguió un procedimiento sencillo que se describe a continuación.

NCTUns se encuentra en la página de Internet SIMREAL technology<sup>25</sup>. El primer paso fue descargar el software que se haya comprimido como primera presentación en formato tar.gz. Se almacenó y se extrajo en el directorio root para iniciar la instalación.

Como es particular en los software de Linux, NCTUns no viene con un ejecutable que permita realizar la instalación automáticamente, por eso se hace necesario realizarla desde el terminal<sup>26</sup>. Con el comando descrito a continuación en 1, se ingresa desde el terminal a la carpeta del software y se da inicio a la instalación digitando el comando 2:

```
cd NCTUns-5.0 (1)
./install.sh (2)
```

Durante el proceso instalación, NCTUns automáticamente crea un nuevo kernel para Fedora, desde el cual se puede ejecutar el simulador. Este nuevo kernel aparece en la ventana del gestor de arranque junto con los otros sistemas operativos instalados en el PC. También un usuario nuevo diferente del súper-

---

<sup>25</sup> NCTUns [en línea]: Taiwan, SIMREAL TECHNOLOGY, 2002 [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw/>

<sup>26</sup> consola de comandos de Linux.

usuario o root es establecido puesto que, el software no permite revisar los resultados de simulación con el usuario root configurado en el dispatcher<sup>27</sup>.

Después de terminada la instalación se reinició el sistema operativo para luego seleccionar en el gestor de arranque de Fedora, el kernel que NCTUns dispuso con anterioridad.

Desde la pantalla de selección de usuario, para entrar al escritorio de Fedora se accedió al sistema con la cuenta del usuario root, para poder contar con todos los permisos de configuración de Linux necesarios.

Nuevamente se hace uso del terminal para ejecutar los comandos:

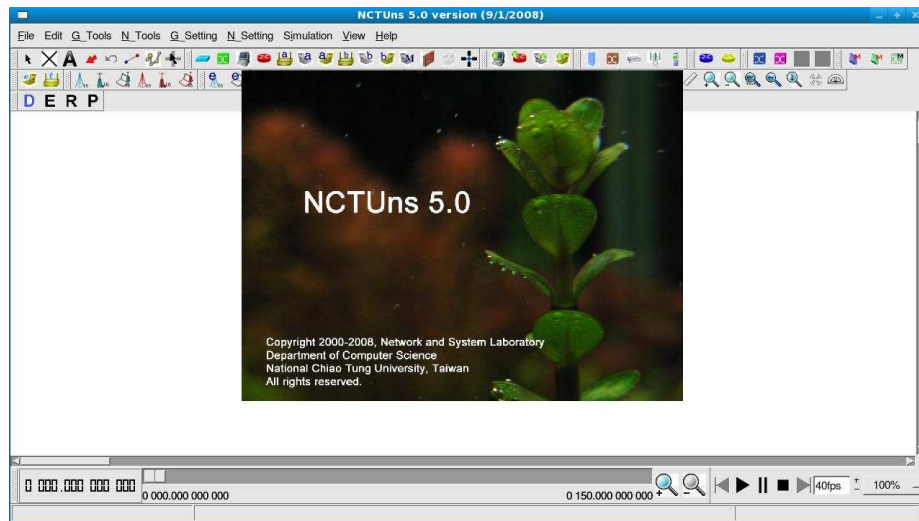
- `./dispatcher.sh`
- `./coordinator.sh` (en otra consola de comandos)
- `./nctunsclient.sh` (en otra consola de comandos)

Aplicaciones ubicadas en la carpeta `/usr/local/nctuns/lib`. Con estos comandos ejecutados, emerge el interfaz gráfico que NCTUns 5.0 presenta a sus usuarios:

---

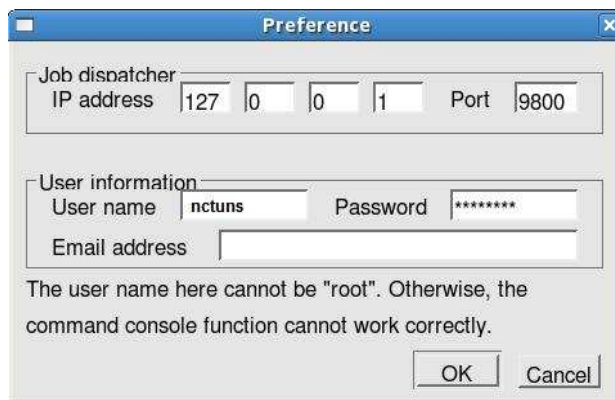
<sup>27</sup> Dispatcher: programa de nivel de usuario que soporta simulaciones concurrentes sobre múltiples maquinas de simulación. Puede coordinar simultáneamente un gran número de usuarios del GUI y de maquinas de simulación.

**Figura 3. Inicio de NCTUns**



La Figura 3 muestra la primera presentación del interfaz gráfico (GUI) cuando se ejecuta el software NCTUns. El usuario `nctuns`<sup>28</sup> que se creó en la instalación del software se habilita en el panel del *dispatcher* el cual emerge cuando se sigue la ruta: `G_Setting/Dispatcher`<sup>29</sup>.

**Figura 4. Configuración de usuario NCTUns**



<sup>28</sup> En la instalación de NCTUns se crea un usuario denominado `nctuns` desde el cual es necesario ejecutar el software de simulación

<sup>29</sup> Cuando se corre el *coordinator* y el *dispatcher* sobre una misma máquina, es necesario crear un usuario diferente de `root`, en este caso `nctuns`, para que se presente sin inconveniente la conexión entre el *dispatcher* y el *coordinator*.

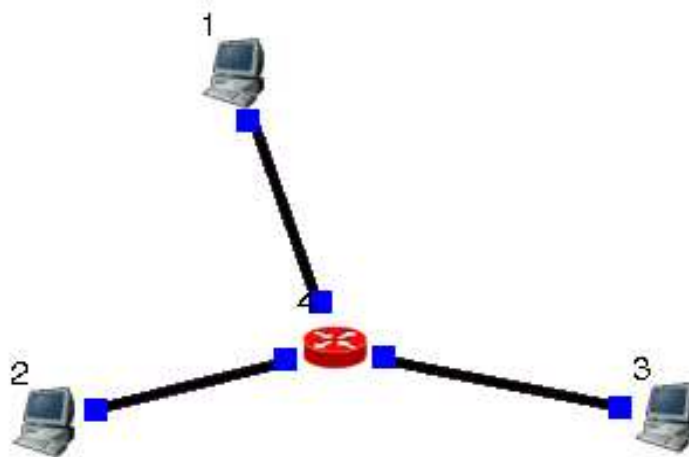


La Figura 4 muestra la debida configuración del *dispatcher*, la cual permite indicar la IP de la máquina, el puerto lógico, y los datos de la cuenta de un usuario del sistema (puede ser el usuario de NCTUns) que sea diferente al súper usuario o *root*.

**6.1.3. Pruebas de simulación.** Para comprobar el buen funcionamiento del software se recurrió a la exploración de los ejemplos dispuestos para el usuario principiante, los cuales se encuentran en la carpeta */root/NCTUns 5.0/examples*, los mismos que se muestran como demos en *SIMREAL technology*<sup>30</sup>.

En este punto del proyecto, se experimentó con una topología sencilla de 4 dispositivos de red, 3 Hosts y un Router, que generan tráfico de conexión entre sí.

**Figura 5. Topología de prueba**



La Figura 5 muestra la topología de red que se utilizó para generar un tráfico sencillo de datos entre sus terminales y comprobar la buena instalación del software.

---

<sup>30</sup> SIMREAL TECHNOLOGY, Op. cit., Disponible en Internet: <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw/>

**Tabla 3. Generadores de tráfico de NCTUns**

| Generador de tráfico | concepto   |
|----------------------|--|
| stcp                 | send tcp, configurado en nodo fuente genera trafico TCP hacia nodo destino<br>rtcp   |
| rtcp                 | receive TCP, configurado en nodo destino recibe tráfico TCP desde el nodo que ejecuta el stcp.   |
| stg                  | source traffic generator, configurado en nodo fuente genera trafico TCP o UDP hacia destino, permitiendo configuraciones adicionales de trazado de paquetes respecto a stcp. |
| rtg                  | receive traffic generation, configurado en nodo destino recibe tráfico TCP o UDP desde nodo que ejecuta stg.   |
| rtprecvonly          | rtp receive only, permite en un nodo solo recibir tráfico rtp.   |
| rtpsendrecv          | Rtp send receive, permite en un nodo solo envía y recibe tráfico rtp.  |

Para generar un intercambio de paquetes y tramas en la topología de la Figura 5, se hizo uso del generador de tráfico y su correspondiente receptor, stg-rtg presentes en la Tabla 3, donde se describen los generadores de tráfico que NCTUns ofrece por defecto a los usuarios de la herramienta, para la ejecución de simulaciones en redes de telecomunicaciones. La configuración del generador de tráfico stg para esta prueba fue la siguiente:

- **Configuración host 1 transmisor.**

Tiempo de inicio de ejecución de aplicaciones de tráfico<sup>31</sup>: 0.5s

Tiempo de parada de ejecución de aplicaciones de tráfico: 20.0s

Tiempo de ejecución de aplicación de tráfico stg: 20.0s

Puerto del receptor: 7000

Dirección IP receptor: 1.0.3.1

---

<sup>31</sup> Hace referencia a todas las aplicaciones de generación y recepción de tráfico de datos configuradas en la ventana *Application*.

- **Configuración host 2 transmisor.**

Tiempo de inicio de ejecución de aplicaciones de tráfico: 1.0s

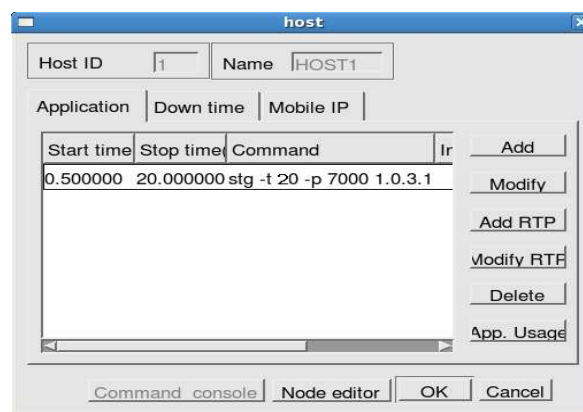
Tiempo de parada de ejecución de aplicaciones de tráfico: 20.0s

Tiempo de ejecución de aplicación de tráfico stg: 12.0s

Puerto del receptor: 8000

Dirección IP receptor: 1.0.3.1

**Figura 6. Configuración Host 1**



En la Figura 6, se observa la ventana de configuración para el generador de tráfico del los hosts fuente, 1 y 2. Desde esta ventana se adhieren y modifican los comandos que llaman las aplicaciones de generación y recepción de tráfico las cuales propician el intercambio de datos entre los nodos fuente y destino del enlace. En este caso, stg es la aplicación para generar datos desde el host 1 y 2 hacia el host 3. En esta línea de configuración, -t indica el tiempo que dura la ejecución del generador de trafico stg.

- **Configuración host 3:**

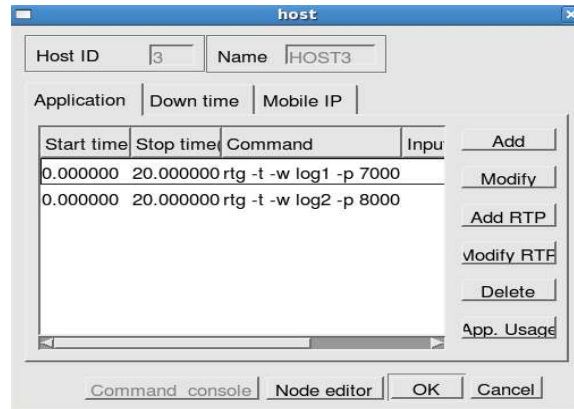
Tiempo de inicio: 0.0s

Tiempo de parada: 20s

Puerto que recibe desde el host 1: 7000

Puerto que recibe desde el host 2: 8000

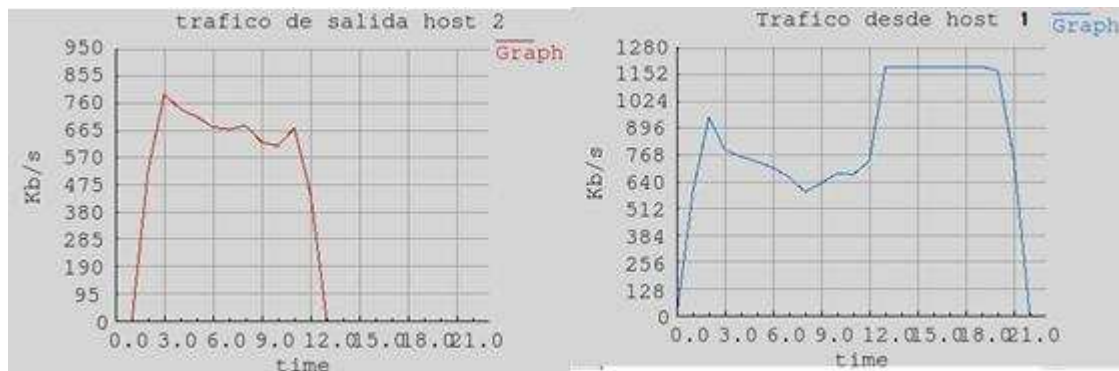
**Figura 7. Configuración de host destino**



En la Figura 7 se muestra la ventana de configuración del receptor de tráfico rtg en el host destino, el nodo 3 de la topología de red en la Figura 5. El comando -t determina que el tráfico de datos es TCP y el comando -w log1 y log2 genera una gráfica adicional que reporta el rendimiento por segundo de la conexión.

**6.1.4. Resultados.** Las curvas de rendimiento de los paquetes que salen de los host 1 y 2 se presentan en la Figura 8.

**Figura 8. Curvas de rendimiento paquetes que salen de nodos 1 y 2**



En la Figura 8 se observa el rendimiento de la tecnología de red Ethernet a nivel de capa MAC<sup>32</sup>. Una tasa de transmisión entre 1100 y 1200 Kilobits por segundo, es compartida por los hosts 1 y 2 en el momento en que éstos transmiten

<sup>32</sup> Capa de control de acceso al medio.

simultáneamente paquetes hacia el host 3. La técnica de CSMA/CD, propicia el comportamiento que generó estas dos curvas de rendimiento para los host 1 y 2 que del segundo 1.0 al 12 generan tráfico de salida al mismo tiempo.

**6.1.5. Errores presentados.** La aplicación de las reglas del cortafuegos (firewall) en Linux, bloqueó gran cantidad de los paquetes enviados a la red disminuyendo el número de datos transferidos. Esta circunstancia confirma que NCTUns utiliza recursos reales del kernel para efectuar sus simulaciones.

La solución a este inconveniente fue ingresar la línea de código expuesta en 3, para que de forma inmediata, se detengan todos los servicios que ofrece el cortafuegos iptables de Fedora 9.

```
services iptables stop (3)
```

En adelante, la herramienta se desempeña sin inconvenientes resaltando su disposición para realzar las demás experimentaciones planteadas para el proyecto.

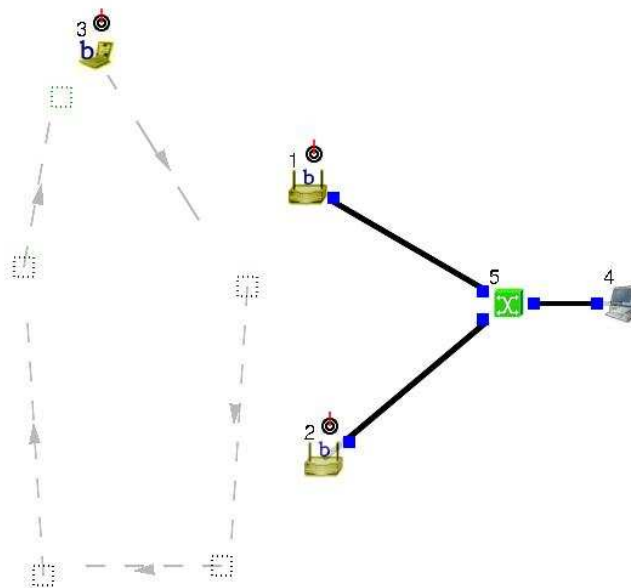
## **6.2. IMPLEMENTACION DE LAS REDES INALAMBRICAS (WLAN Y WWAN) EN LA HERRAMIENTA DE SIMULACION**

La finalidad en este punto de la experimentación es la de explorar el funcionamiento del software NCTUns, aplicado en redes heterogéneas que soportan Handoff horizontal, e identificar el procedimiento para poner a punto esta herramienta, y luego utilizarla en la simulación del algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de handoff vertical en redes inalámbricas.

**6.2.1. Configuración y simulación de una red Wi-Fi.** A continuación, se observa el comportamiento de las redes de tecnología Wi-Fi sobre el ambiente simulado proporcionado por NCTUns.

NCTUns ofrece 4 modos de operación que le permiten al usuario trabajar en su simulación por etapas. El modo de operación *Draw Topology* donde se dibuja la topología de red, el modo de operación *Edit Property* donde se configuran las aplicaciones de generación y recepción de tráfico como también los trazadores de rendimiento, el modo de operación *Run Simulation* donde el GUI trasfiere todos los archivos de configuración de la simulación en proceso al servidor de simulación para que este los ejecute y el modo de operación *Play Back* en el cual el servidor de simulación regresa al GUI los resultados de la simulación para que estos puedan ser observados de manera grafica por el usuario en el interfaz grafico. En el modo de operación *Draw Topology*, se diseña la siguiente topología:

**Figura 9. Topología Wi-Fi**



La Figura 9 muestra el arreglo de la topología de red inalámbrica para la prueba con la tecnología de red Wi-Fi en esta sección. Con la utilidad *moving path* (👤), se traza la ruta seguida por el nodo móvil en el transcurso de la comunicación y con la herramienta de selección de nodos inalámbricos (👤) se forma una subred inalámbrica entre el WAP<sup>33</sup> 1 y el nodo móvil WLAN.

<sup>33</sup> Wireless Access Point

**6.2.1.1. Configuración de parámetros.** En el modo de operación *Edit Property* se configura en el nodo móvil, la aplicación `stcp -p 8000 1.0.1.1`. El generador de tráfico de red `stcp`, inicia una transmisión de paquetes con el nodo de dirección IP 1.0.1.1 por el puerto 8000, a partir de los 0.5 segundos hasta 200 segundos.

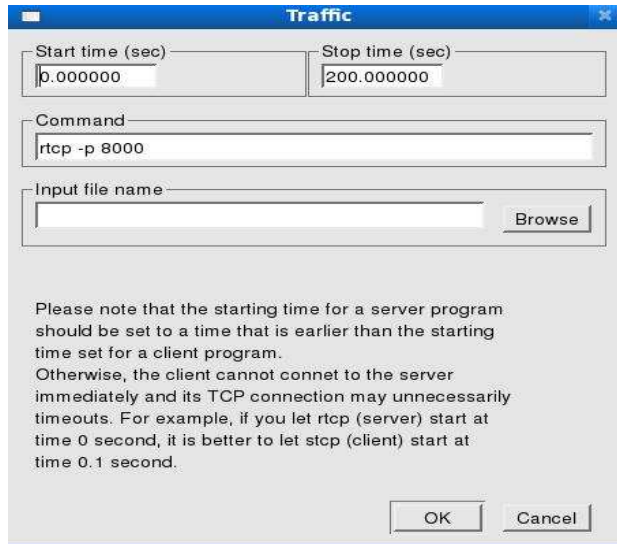
**Figura 10. Configuración generador de tráfico**



En la Figura 10 se observa la ventana de configuración del generador de tráfico que se utiliza en el nodo que funciona como fuente de paquetes, el nodo 3, (ver Figura 9). Esta configuración fue expresada en el párrafo anterior.

En el terminal fijo, (host 4), se configuro la aplicación `rtcp` contenida en la Tabla 3, para que reciba los datos que llegan, por el puerto 8000. La Figura 11 muestra la ventana de configuración de la aplicación `rtcp` en este dispositivo, donde además de la de la aplicación de tráfico, se define el puerto lógico por el cual se recibirán los datos.

**Figura 11. Configuración de receptor**



En la ventana mostrada en la Figura 11 se define haciendo uso del comando `-p 8000`, el puerto por el cual el host 4 recibirá los paquetes provenientes del nodo 3. Si no se especifica el puerto, las aplicaciones stcp y rtcp definirán por defecto el puerto 5000. Por último, en este modo de operación *Edit Property*<sup>34</sup>, en el editor de nodo se habilita el trazador estadístico de paquetes.

En el modo de operación *Run Simulation*, se ejecuta la simulación hasta completar los 200 segundos y se analiza los resultados.

**6.2.1.2. Análisis de resultados.** Se observó el comportamiento del estándar IEEE 802.11b<sup>35</sup>, donde se ejecuta el escaneo activo por parte del nodo móvil y el escaneo realizado por el WAP.

---

<sup>34</sup> En este modo de operación el GUI envía todos los archivos de configuración de la simulación al servidor de simulación para que este los ejecute. En el coordinador de NCTUns se puede observar en tiempo real la ejecución realizada por el servidor de simulación y se puede pausar el proceso en cualquier momento.

<sup>35</sup> Velocidad máxima teórica es de 11 Mbit/s y en la practica es de 5.9 Mbit/s, utiliza el método de acceso CSMA/CA, funciona en la banda de 2.4 GHz.



**Figura 12. Trazador de paquetes**



| Seq | IP     | Dir | Port    | Protocol | Details | Seq                           |
|-----|--------|-----|---------|----------|---------|-------------------------------|
| 1   | 802.11 | BTX | 6231    | 2190     | PROBQ   | <0 0> <3 0 0> 0 37 0 NONE 1   |
| 2   | 802.11 | BTX | 103707  | 2320     | BCON    | <0 0> <1 0 0> 1 54 0 NONE 3   |
| 3   | 802.11 | BRX | 103714  | 2320     | BCON    | <0 0> <1 2 0> 1 54 0 NONE 3   |
| 4   | 802.11 | BTX | 115034  | 2320     | BCON    | <0 0> <2 0 0> 2 54 0 NONE 3   |
| 5   | 802.11 | BRX | 115041  | 2320     | BCON    | <0 0> <2 1 0> 2 54 0 NONE 3   |
| 6   | 802.11 | BTX | 505831  | 2190     | PROBQ   | <0 0> <3 0 0> 3 37 0 NONE 2   |
| 7   | 802.11 | BTX | 1007631 | 2190     | PROBQ   | <0 0> <3 0 0> 4 37 0 NONE 3   |
| 8   | 802.11 | BRX | 1007637 | 2190     | PROBQ   | <0 0> <3 1 0> 4 37 0 NONE 3   |
| 9   | 802.11 | TX  | 1016934 | 2280     | PROBR   | <0 0> <1 3 3> 5 49 0 NONE 3   |
| 10  | 802.11 | RX  | 1016940 | 2280     | PROBR   | <0 0> <1 3 3> 5 49 0 NONE 3   |
| 11  | 802.11 | TX  | 1019320 | 2030     | ACK     | <0 0> <3 1 1> 6 14 0 NONE 3   |
| 12  | 802.11 | RX  | 1019326 | 2030     | ACK     | <0 0> <3 1 1> 6 14 0 NONE 3   |
| 13  | 802.11 | BTX | 1028356 | 2320     | BCON    | <0 0> <1 0 0> 7 54 0 NONE 3   |
| 14  | 802.11 | BTX | 5993107 | 2320     | BCON    | <0 0> <1 0 0> 29 54 0 NONE 3  |
| 15  | 802.11 | BRX | 5993114 | 2320     | BCON    | <0 0> <1 2 0> 29 54 0 NONE 3  |
| 16  | 802.11 | BTX | 6004431 | 2190     | PROBQ   | <0 0> <3 0 0> 30 37 0 NONE 13 |
| 17  | 802.11 | TX  | 6505031 | 2220     | ASSQ    | <0 0> <3 1 1> 32 41 0 NONE 3  |
| 18  | 802.11 | RX  | 6505037 | 2220     | ASSQ    | <0 0> <3 1 1> 32 41 0 NONE 3  |
| 19  | 802.3  | TX  | 6507257 | 550      | DATA    | <0 0> <1 5> 34 64 0 NONE      |
| 20  | 802.3  | RX  | 6507267 | 550      | DATA    | <0 0> <1 5> 34 64 0 NONE      |
| 21  | 802.11 | TX  | 6507357 | 2030     | ACK     | <0 0> <1 3 3> 33 14 0 NONE 3  |
| 22  | 802.11 | RX  | 6507363 | 2030     | ACK     | <0 0> <1 3 3> 33 14 0 NONE 3  |
| 23  | 802.3  | TX  | 6507817 | 560      | DATA    | <0 0> <5 2> 34 64 0 NONE      |
| 24  | 802.3  | TX  | 6507817 | 537      | DATA    | <0 0> <5 4> 34 64 0 NONE      |
| 25  | 802.3  | RX  | 6507827 | 537      | DATA    | <0 0> <5 4> 34 64 0 NONE      |
| 26  | 802.3  | RX  | 6507827 | 560      | DATA    | <0 0> <5 2> 34 64 0 NONE      |
| 27  | 802.11 | TX  | 6515587 | 2190     | ASSR    | <0 0> <1 3 3> 35 37 0 NONE 3  |
| 28  | 802.11 | RX  | 6515593 | 2190     | ASSR    | <0 0> <1 3 3> 35 37 0 NONE 3  |
| 29  | 802.11 | TX  | 6517883 | 2030     | ACK     | <0 0> <3 1 1> 37 14 0 NONE 3  |
| 30  | 802.11 | RX  | 6517889 | 2030     | ACK     | <0 0> <3 1 1> 37 14 0 NONE 3  |
| 31  | 802.11 | TX  | 6520413 | 2430     | DATA    | <0 0> <3 1 1> 24 70 0 NONE 3  |
| 32  | 802.11 | RX  | 6520419 | 2430     | DATA    | <0 0> <3 1 1> 24 70 0 NONE 3  |
| 33  | 802.3  | BTX | 6522849 | 551      | DATA    | <0 0> <1 5> 24 64 0 NONE      |

La Figura 12, muestra el trazador de paquetes con sus filas numeradas del 1 al 33, con el fin de aclarar el proceso de gestión de redes correspondiente a la tecnología Wi-Fi dispuesta en NCTUns, (ver Tabla 4). Los dispositivos de red inalámbrica WAP inician la búsqueda de dispositivos compatibles bajo la cobertura de su señal difundiendo tramas BCON como se observa en las líneas de la 2 a la 5 y de la 13 a la 15 en la Figura 12. El nodo móvil inicia el reconocimiento de los WAP's enviando tramas PROBQ, como se muestra en la línea 8, lo que indica que este dispositivo ejecuta un escaneo activo para Identificar las capacidades de los WAP's, determina cuál le ofrece mejor señal y solicitar la asociación con la trama ASSQ, como lo muestra la línea 17. La solicitud de asociación es respondida por el nodo WAP con una trama ASSR que revela la aceptación o rechazo de asociación. En caso de ser aceptada, se informara en esta trama el ID y tasas de transferencia (ver línea 27 de la Figura 12).

Después de iniciada la conexión y aunque no se muestre en la Figura 12, en esta simulación el nodo móvil continúa probando la señal inalámbrica de los nodos WAP que lo rodeaban escuchando las tramas BCON, para luego realizar si es necesario, el traspaso hacia otro dispositivo con mejor señal de comunicación.

**Tabla 4. Tramas de gestión 802.11b en NCTUns**

| Trama  | Peso en Bytes | Concepto  |
|--------|---------------|---|
| PROBQ  | 37            | Probe Request. Las estaciones utilizan tramas de solicitud de prueba cuando necesitan obtener información de otra estación, por ejemplo obtener una lista de puntos de acceso disponible.   |
| PROBR  | 49            | Probe Response. Respuesta a la solicitud de prueba que contiene información de QoS. Capacidad de información, tasas de transmisión soportadas, etc.   |
| BEACON | 54            | Enviado por dispositivos WAP constantemente para anunciar su presencia y transmitir información, tal como la estampa e tiempo <sup>36</sup> , SSID <sup>37</sup> y otros parámetros que relacionan al AP con otras interfaces de red inalámbrica bajo su cobertura. |
| ASSQ   | 41            | Association Request. Trama de asociación que permite reservar recursos en el WAP al cual se le solicita.  |
| ASSR   | 37            | Association Response. Respuesta de aceptación o rechazo a la solicitud de asociación con información de ID y tasas de transferencia.  |
| REASSQ | 44            | RE-Association Request. Solicitud de traspaso a otro dispositivo WAP con mejor QoS. Implica coordinación en tamaño de buffers entre WAPs  |
| REASSR | 37            | RE-Association Response. Respuesta de aceptación o rechazo a la solicitud de re-asociación con información de ID y tasas de transferencia <sup>38</sup> .   |

<sup>36</sup> Después de recibir una trama beacon, una estación utiliza la estampa de tiempo para actualizar su tiempo local. Este proceso permite la sincronización entre todas las estaciones asociadas con la misma estación base.

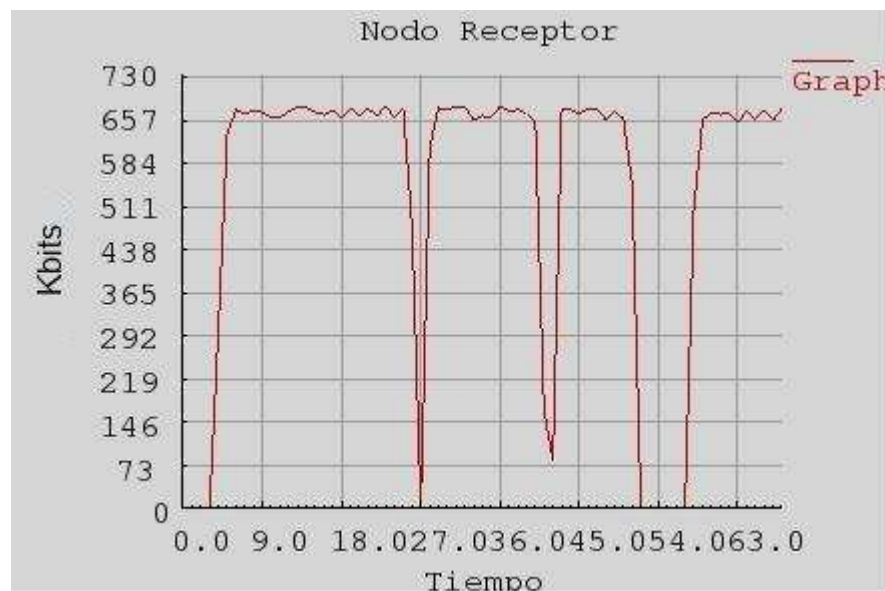
<sup>37</sup> SSID (Service Set Identifier) Identificador de Set de Servicios

<sup>38</sup> Understanding 802.11 Frame Types [en línea]: Management Frames. Estados Unidos: Wi-Fi PLANET, agosto 15 del 2002 [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/1447501>

En la Tabla 4, se observan las tramas de gestión que los dispositivos de red inalámbrica de tecnología Wi-Fi utilizan para establecer, mantener reasignar o terminar una conexión con otro dispositivo de la misma tecnología.

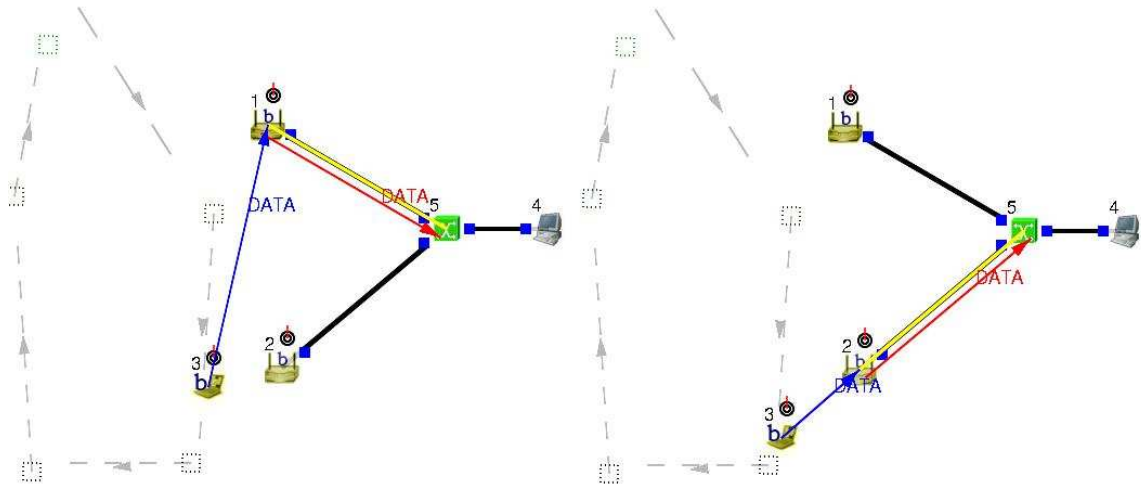
En el trazador de rendimiento se puede observar la curva de rendimiento de la comunicación resaltando el tráfico de paquetes respecto al tiempo. En la Figura 13 se muestran la cantidad de Kilobits recibidos en el nodo 4. El registro que se realizó para esta gráfica fue a nivel de capa MAC, lo que indica que solo se tuvo en cuenta la entrada de paquetes al dispositivo, descartando el registro de entrada de tramas de gestión correspondiente a la tecnología WI-FI.

**Figura 13. Curva de rendimiento red Wi-Fi**



En la Figura 13, se observa que se recibieron alrededor de 657 Kbit/s. Nótese que en el segundo 27 la recepción de paquetes llega a cero, eso se debe al cambio de conexión, donde el nodo móvil deja de transmitir al punto de acceso inalámbrico 1 para transmitir al punto de acceso inalámbrico 2.

**Figura 14. Itinerancia en infraestructura**



La Figura 14 muestra como se observa en el GUI de NCTUns, la itinerancia en infraestructura<sup>39</sup> que se realiza en la topología de red organizada para la experimentación con la tecnología de red inalámbrica Wi-Fi.

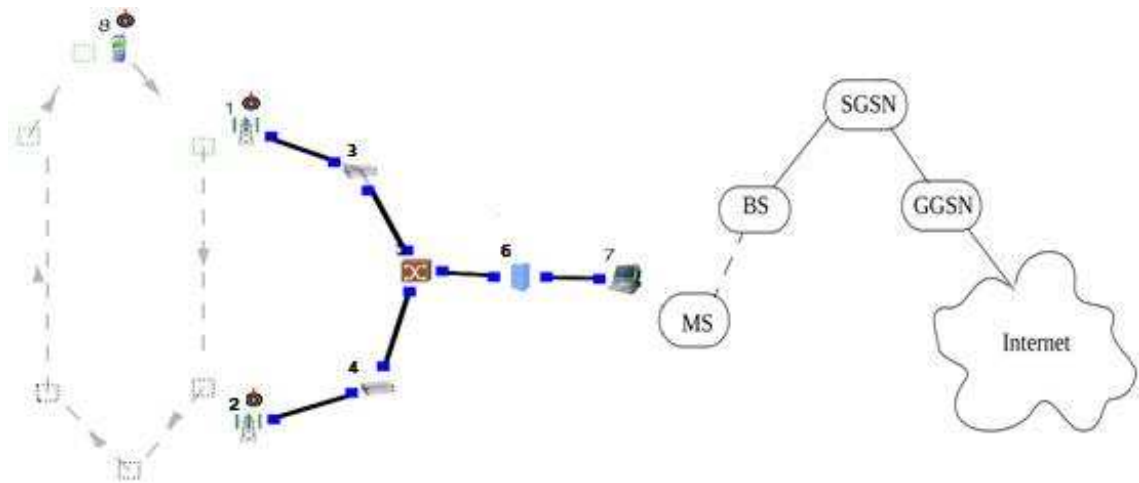
Mientras el nodo móvil se desplaza, se ejecuta el proceso denominado itinerancia en infraestructura<sup>40</sup> cambiando el curso de la comunicación hacia el nodo WAP que le ofrece mejor señal.

**6.2.2. Configuración y simulación de una red GPRS.** En este punto, se presenta la configuración y simulación de una topología sencilla de red GPRS, donde se pretende mostrar la manera como NCTUns recrea esta tecnología y el procedimiento para llegar a la simulación de la misma. La topología que diseñada para el desarrollo de ésta prueba se presenta en la Figura 15.

<sup>39</sup> En WI-FI, es el proceso de cambio de un Wirless Access Point (WAP) a otro que ofrezca mejor calidad de señal, realizado por un nodo móvil.

<sup>40</sup> Hace referencia al cambo de conexión entre estaciones base de tecnología Wi-Fi

**Figura 15. Topología de red GPRS**



Comparándola con la arquitectura general de GPRS, la topología de esta simulación se compone de un teléfono GPRS (MS - nodo 8) no convencional, puesto que NCTUns presenta este dispositivo con el protocolo TCP/UDP en su pila de protocolos, característica poco normal en los teléfonos celulares de segunda generación, pero normal en los teléfonos de tecnología 3G y 4G. Esto permite simular aplicaciones de red más avanzadas para la tecnología. Este dispositivo se situó bajo la señal de cobertura de los puntos de acceso de red inalámbrica GPRS presentados en esta topología y se marcó, una ruta con la utilidad *moving path* (👤) que será seguida por el dispositivo en el transcurso de la simulación.

Luego se ubicaron las estaciones base (BS – nodos 1 y 2) que son las que transmiten y reciben las ondas de radio. Enseguida, se conectaron los nodos de soporte de servicios GPRS (SGSN – nodos 3 y 4). El SGSN ofrece los servicios de conmutación de circuitos y servicios GSM; se encarga de controlar las sesiones y funciones de gestión de movilidad en GPRS tales como traspasos, radio búsquedas y comandos de agregación o desagregación de la red (*attach/detach*). Después, se conectaron el switch GPRS y el nodo soporte de puerta de enlace (GGSN – nodo 6).

NCTUns utiliza el switch GPRS que a nivel práctico no es necesario, para habilitar múltiples túneles entre los dispositivos SGSN y GGSN, permitiendo que las

direcciones IP de los puntos finales de los túneles compartan la misma ID de subred, propiciando una fácil gestión.

El GGSN se encarga de las funciones de autenticación y gestión de localización, provee interconexión entre una red GPRS y la red externa conmutada, que en este caso es la red que se conecta al PC.

**6.2.3. Configuración y simulación de una red GPRS.** Primero se configuraron las estaciones base como se muestra en la Figura 16, donde se selecciona para cada BS, la ficha *Frequency channel* para determinar el número de canales de frecuencia permitidos en la estación base. En una red GPRS las estaciones base vecinas usan diferentes canales de frecuencias para evitar interferencia de señal y colisión de paquetes, por tal motivo, para la BS 1 se definen los canales de frecuencia del 1 al 5 y para la BS 2 del 6 al 11. Luego se selecciona la ficha *Channel slot* para determinar el número de ranuras de tiempo para carga y descarga de datos por un usuario GPRS. Por defecto, se asignan los valores 3 y 1 para descarga y carga de tráfico respectivamente.

Por último se accede a la ficha de *Neighborhood radius* para determinar el radio de consideración para estaciones base vecinas. Cada estación base dentro de este radio de cobertura se considera como vecina. Cuando un teléfono GPRS es asociado a esta estación base, es notificado por la misma de la existencia si la hubiere, de las estaciones base dentro del radio de consideración para estaciones base vecinas. El teléfono GPRS monitoreará la fuerza de la señal de las vecinas para facilitar el *roaming* y handoff entre estaciones base.

**Figura 16. Configuración de Estación Base**

The figure shows three sequential screenshots of the 'Base Station' configuration window, each with a different tab selected.

- First Screenshot (Down time tab):** Shows 'BS ID' as 1. The 'Down time' tab is selected. Below it, 'Starting Frequency Channel' is set to 1 and 'Ending Frequency Channel' is set to 5. At the bottom are 'Node editor', 'OK', and 'Cancel' buttons.
- Second Screenshot (Frequency channel tab):** The 'Frequency channel' tab is selected. It shows 'Downlink time slot number' as 3 and 'Uplink time slot number' as 1. There is a 'C.T.A.BS' field. At the bottom are 'Node editor', 'OK', and 'Cancel' buttons.
- Third Screenshot (Neighborhood radius tab):** The 'Neighborhood radius' tab is selected. It shows 'Neighborhood radius' as 350 meters. A text box explains: 'The geographical area within the radius of the neighborhood circle centered at this BS. Every BS that is within this circle is considered to be a neighboring BS of this BS. When a phone is associated with this BS, it can use its idle time slots to monitor the signal strength of these neighboring BSs.' At the bottom are 'Node editor', 'OK', and 'Cancel' buttons.

Un paso fundamental para conseguir una simulación exitosa, es programar la agregación (*attachment*) del teléfono móvil a la red GPRS para que ésta lo reconozca. El comando *Attach* en la ficha acción (*Action*) de la ventana de configuración del teléfono móvil que se muestra en la Figura 17, es el que permite este suceso.

**Figura 17. Configuración teléfono GPRS**

The figure shows the 'Phone' configuration window with the 'Action' tab selected. It contains a table with the following data:

| Time | Action | NSAPI | QoS level |
|------|--------|-------|-----------|
| 2.00 | Attach | 0     | 1         |

At the bottom right of the table are buttons for 'Add', 'Delete', and 'Modify'. At the bottom of the window are 'Node editor', 'OK', and 'Cancel' buttons.

En esta ventana también se configura la aplicación de tráfico para generar o recibir paquetes de datos en el panel de aplicación (*Aplication*) y si es necesario, el tiempo de desactivación del teléfono.



Las aplicaciones usadas para generar tráfico de red son stg-rtg, descritas en la Tabla 4. La Figura 18, muestra el trazador de paquetes que presenta NCTUns para registrar el tráfico en la simulación en esta prueba.

**Figura 18. Trazador de paquetes de NCTUns**

```

1 802.3 TX 0 808 DATA <0 0> <1 3> 0 20 0 NONE
2 802.3 TX 0 833 DATA <0 0> <2 4> 0 20 0 NONE
3 802.3 RX 0 800 DATA <0 0> <1 3> 0 20 0 NONE
4 802.3 RX 0 800 DATA <0 0> <2 4> 0 20 0 NONE
5 802.3 RX 800 160 DATA <0 0> <3 1> 0 4 0 NONE
6 802.3 TX 800 172 DATA <0 0> <3 1> 0 4 0 NONE
7 802.3 RX 800 160 DATA <0 0> <4 2> 0 4 0 NONE
8 802.3 TX 800 170 DATA <0 0> <4 2> 0 4 0 NONE
9 GPRS TX 22227975 5770 GPRS_ACCESS <0 0> <8 1> 0 11 0 NONE 1
10 GPRS RX 22227978 5770 GPRS_ACCESS <0 0> <8 1> 0 11 0 NONE 1
11 GPRS TX 23197671 5770 GPRS_CTL <0 0> <8 1> 0 114 0 NONE 2
12 GPRS RX 23197674 5770 GPRS_CTL <0 0> <8 1> 0 114 0 NONE 2
13 GPRS TX 23243847 5770 GPRS_CTL <0 0> <8 1> 1 114 0 NONE 2

```

Pasados 2.2 segundos

```

14 GPRS RX 22955250 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 3 114 0 NONE 127
15 802.3 TX 22972572 5065 DATA <0 0> <1 3> 0 121 0 NONE
16 802.3 RX 22972572 4840 DATA <0 0> <1 3> 0 121 0 NONE
17 802.3 RX 22977412 4160 DATA <0 0> <3 1> 0 104 0 NONE
18 802.3 TX 22977412 4229 DATA <0 0> <3 1> 0 104 0 NONE
19 GPRS TX 22972566 5770 GPRS_DATA <0 0> <8 1> 3 114 0 NONE 2
20 GPRS RX 22972572 5770 GPRS_DATA <0 0> <8 1> 3 114 0 NONE 2
21 GPRS TX 23001420 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 0 114 0 NONE 127
22 GPRS RX 23001426 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 0 114 0 NONE 127
23 802.3 RX 26943702 4200 DATA <0 0> <1 3> 0 105 0 NONE
24 802.3 TX 26943702 4550 DATA <0 0> <1 3> 0 105 0 NONE

```

Pasados 2.6 segundos

```

25 GPRS TX 30112524 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 2 114 0 NONE 127
26 GPRS RX 30112530 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 2 114 0 NONE 127
27 GPRS TX 30158700 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 3 114 0 NONE 127
28 GPRS RX 30158706 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 3 114 0 NONE 127
29 GPRS TX 30204876 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 0 114 0 NONE 127
30 GPRS RX 30204882 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 0 114 0 NONE 127
31 GPRS TX 30251052 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 1 114 0 NONE 127
32 GPRS RX 30251058 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 1 114 0 NONE 127
33 GPRS TX 30297228 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 2 114 0 NONE 127
34 GPRS RX 30297234 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 2 114 0 NONE 127
35 GPRS TX 30343404 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 3 114 0 NONE 127
36 GPRS RX 30343410 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 3 114 0 NONE 127
37 GPRS TX 95376530 5770 GPRS_DATA <0 0> <8 1> 3 114 0 NONE 2
38 GPRS RX 95376532 5770 GPRS_DATA <0 0> <8 1> 3 114 0 NONE 2
39 802.3 TX 95448540 12630 DATA <8 7> <6 7> 31 1518 0 NONE
40 802.3 RX 95448540 1516 DATA <0 0> <5 6> 0 1516 0 NONE
41 802.3 RX 95448550 12630 DATA <8 7> <6 7> 31 1518 0 NONE
42 GPRS TX 95451564 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 0 114 0 NONE 127
43 GPRS RX 95451566 5770 GPRS_CTL <0 0> <1 8> 0 114 0 NONE 127
44 802.3 TX 95461180 606 DATA <7 8> <7 6> 32 70 0 NONE
45 802.3 RX 95461190 606 DATA <7 8> <7 6> 32 70 0 NONE

```



En la Figura 18, se observa la metodología seguida por el protocolo de red GPRS para entablar una comunicación con el dispositivo destino. Nótese que también se registra la participación del protocolo 802.3 (Ethernet), obviamente para la transmisión de paquetes en la red cableada.

En esta figura, la línea 9 muestra el envío de solicitud de asociación (GPRS\_ACCESS) que realiza el móvil GPRS al SGSN, solicitud que primero es enviada a la BTS. Este proceso se programó previamente en la pestaña (*Action*) del la ventana de configuración en el teléfono celular mostrada en la Figura 17. Después de 2.2 segundos la solicitud llega al SGSN 3, y es respondida con la confirmación de asociación como se muestra en las líneas de la 15 a la 18 de la Figura 18, culminando el proceso de adjunción del nodo móvil a la red GPRS. Puesto que la transmisión de paquetes se inicia en el segundo 6, (vea Figura 19), pasados 2.6 segundos el nodo móvil queda a la escucha de tramas de control como se ve en las líneas de la 25 a la 36 en la Figura 18, permitiendo suponer que el dispositivo GPRS entra en estado ocioso (IDLE), evaluando la potencia de la señal de las antenas vecinas.

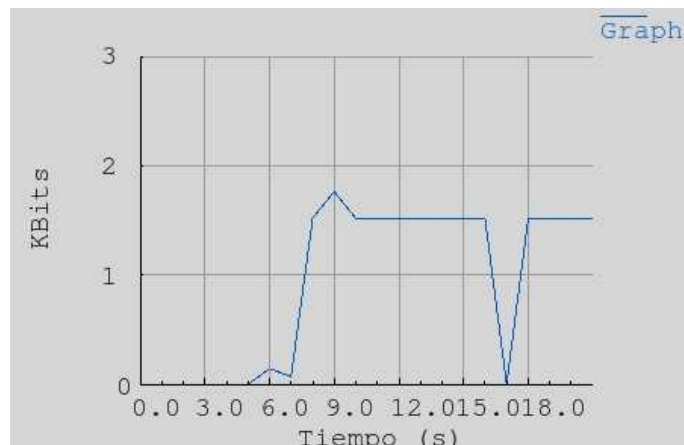
**Tabla 5. Descripción del trazador de paquetes de GPRS**

| <b>Campo</b> | <b>Significado</b>  |
|--------------|---|
| 1            | Protocolo usado (802,3, GPRS)                             |
| 2            | Acción realizada (TX, RX)                                 |
| 3            | Tiempo de inicio de la acción en $\mu s$                  |
| 4            | Duración de la acción en $\mu s$                          |
| 5            | Característica del paquete (datos, acceso o control)      |
| 6            | Nodo fuente y destino del paquete (<0 0>)                 |
| 7            | Nodo fuente, intermediarios y destino del paquete (<1 8>) |
| 8            | ID del paquete  |
| 9            | Tamaño en bits (solo en GPRS)                             |
| 10           | Número de retransmisiones                                 |
| 11           | Inconvenientes presentados (colisión, captura, etc.)      |
| 12           | Canal de frecuencia de la estación base                   |

En la Tabla 5, se observa la descripción del trazador de paquetes de la Figura 18, que NCTUns dispuso para la simulación en esta prueba. En esta tabla se divide en 12 campos de izquierda a derecha, la información contenida en cada línea del

trazador de paquetes de la Figura 18, líneas de información corresponden a cada paquete o trama que salió o entro en cada uno de los dispositivos de plasmados en la topología de red de la Figura 15.

**Figura 19. Curva de rendimiento recepción de paquetes en GPRS**



La Figura 19, muestra la curva de rendimiento de la recepción de paquetes en el host 7, (Vea Figura 15). Nótese que el tráfico de paquetes se inicia a los 6 segundos y que en los segundos 17 y 18 la curva llega a cero, debido al cambio de estación base, donde el teléfono GPRS cambia el enlace de la BTS 1 a la BTS 2, proceso conocido como re-selección de celda<sup>41</sup>. Esta grafica solo presenta el tráfico de datos a nivel de capa MAC, obviando el registro de tramas de gestión usadas en esta tecnología de red. Por tal motivo, desde el inicio de la simulación hasta el segundo 6 no se registró tráfico de datos ya que en este tiempo se realizó la gestión de adjunción a la red, autenticación, gestión de localización, control de sesiones, gestión de movilidad y demás procesos realizados por el SGSN y GGSN. Se puede decir que el trafico de paquetes en esta simulación es de 1518 KBit/s, puesto que como se observa en la línea 41 de la Figura 18 y se corrobora en la Figura 19, el nodo 8 envía hacia el nodo 7 un paquete con un peso de 1518 KBits cada segundo.

**6.2.3.1. Análisis de resultados.** Para analizar el funcionamiento de la tecnología de red GPRS recreada en NCTUns se hizo necesario primero considerar el

<sup>41</sup> Hace referencia al cambio de conexión entre estaciones base de tecnología GPRS.

funcionamiento de esta tecnología en un ambiente real descrita en el marco teórico.

En el comportamiento de la red de tecnología GPRS simulada, no se marca una diferencia clara entre los estados que debería de tomar el nodo móvil mientras transcurre la simulación. No se pueden identificar los paquetes de gestión, tal como en Wi-Fi. La autenticación, la autorización y el nivel de QoS requeridos, son procesos ocultos a la vista del usuario del software. Esto no significa que no son realizados. Sería necesario efectuar una investigación a nivel de código, para observar con detalle el procedimiento seguido por los módulos del software para simular el comportamiento del protocolo para la tecnología de red inalámbrica GPRS. Sin embargo, se puede suponer que el estado activo se presenta al momento en que se envían paquetes de datos como se ve en la Figura 18 en las líneas de la 39 a la 45, el estado inactivo se presenta cuando el nodo móvil no responde a las tramas (GPRS\_CTL) enviadas por la BTS 1 (ver líneas de la 23 a la 34 de la Figura 18) y el estado ocioso (IDLE) se presenta, cuando a pesar de que el nodo móvil no envía datos al host 7, hay gestión entre la BTS, el nodo móvil y el SGSN, (líneas de la 19 a la 24 Figura 18).

Con este análisis, se puede testificar que NCTUns presenta un funcionamiento adecuado frente a la simulación de las redes de tecnología Wi-Fi y GPRS planteadas como caso de estudio, permitiendo el desarrollo de la investigación sin inconvenientes de consideración.

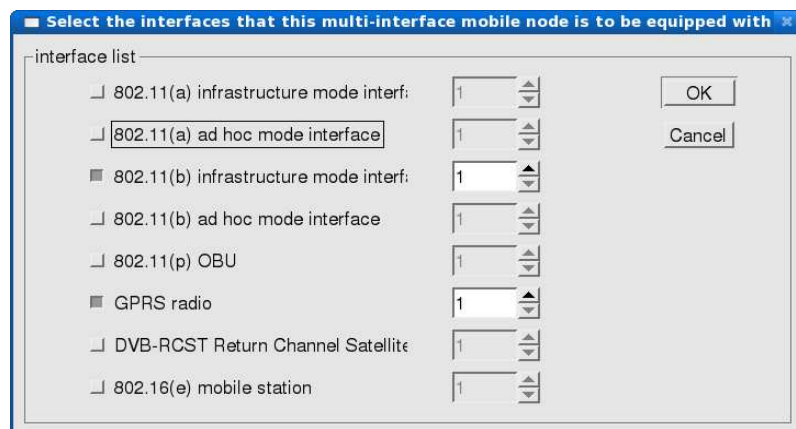
**6.2.4. Configuración y simulación del súper nodo en redes Wi-Fi y GPRS.** En esta fase de la exploración de NCTUns, se simula una topología de red heterogénea, conformada por dos redes inalámbricas, Wi-Fi y GPRS (vea Figura 21), y un nodo móvil multi-interfaz equipado con dos interfaces de tecnología correspondiente a las redes de la topología.

En NCTUns, el dispositivo multi-interfaz se denomina súper nodo, el cuál es un host permanente que representa un conjunto de nodos ordinarios. Después de seleccionar las interfaces de red en el súper nodo, el GUI crea una estructura de nodo correspondiente para las interfaces escogidas como si estas fueran host normales. Luego, se genera un bloque de descripción del nodo multi-interfaz para

especificar los nodos que podrían ser agrupados para formar un dispositivo equipado de varias interfaces de tecnologías de red diferentes. Por último, el GUI genera un patrón de movimiento para el host multi-interfaz y se deshabilita el patrón de movimiento de las otras estructuras de nodo que componen el súper nodo creado.

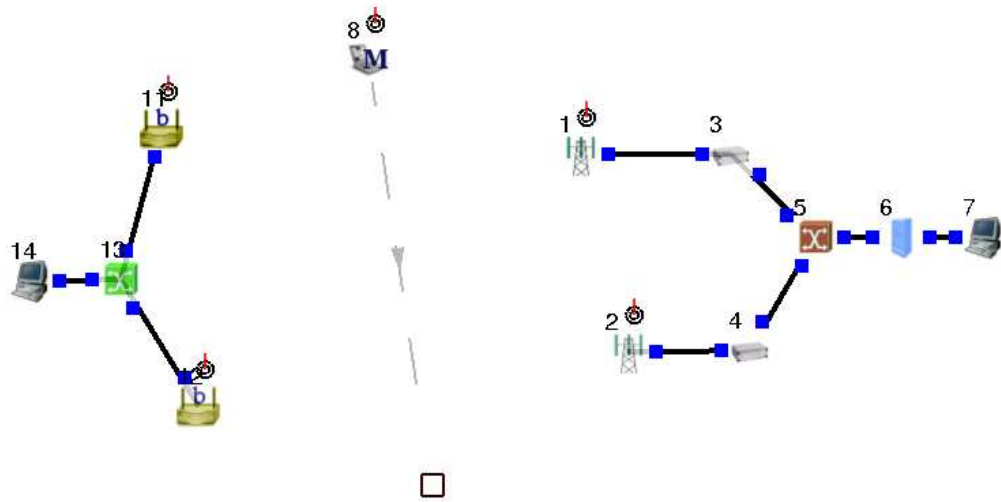
**6.2.4.1. Configuración de parámetros.** Puesto que las interfaces de red que equipan al nodo multi-interfaz son nodos ordinarios, la configuración de los parámetros de cada interfaz es similar a la plateada en las secciones 6.2.1 y 6.2.2.

**Figura 20. Selección de interfaces en súper nodo**



Cuando se ubica el súper nodo dentro del área de trabajo del GUI, inmediatamente aparece la ventana de selección de interfaz que se muestra en la Figura 20, donde se selecciona las interfaces 802.11b modo infraestructura y GPRS radio.

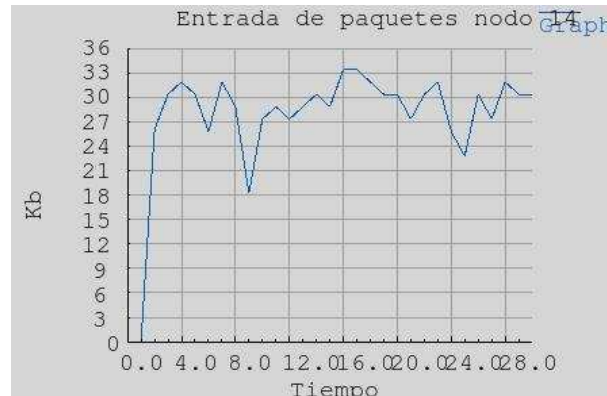
**Figura 21. Topología de red heterogénea, Wi-Fi y GPRS**



En la Figura 21, se muestra la topología de red formada en el interfaz gráfico de usuario (GUI), que se utilizó para experimentar con el dispositivo multi-interfaz que presenta NCTUns para redes heterogéneas. Se habilitó el tráfico de paquetes entre el nodo móvil 8 y los host 14 y 7, con el fin de observar y analizar el comportamiento del dispositivo multi-interfaz en redes de tecnología Wi-Fi y GPRS.

Para generar tráfico de red en la topología, se configura en cada una de las tecnologías de red las aplicaciones stcp-rtcp, (vea la Tabla 3). En los resultados de la simulación se observa una gran dificultad por parte del súper nodo para generar tráfico de red entre las interfaces que lo componen y las redes respectivas. Haciendo referencia precisa a la interfaz GPRS, no fue posible obtener una gráfica de rendimiento para la transmisión y recepción de paquetes que transitan en la red por lo que se asumió, que no se genera ningún tipo de tráfico a pesar de que se configuró correctamente para la tecnología el generador de tráfico mencionado con anterioridad.

**Figura 22. Tráfico de datos en Wi-Fi**



En la Figura 22, se muestra el flujo de datos hacia el nodo 14, la cantidad de Kb que se recibieron en el dispositivo fue muy pequeña comparada con la cantidad normal esperada, (vea Figura 13). Tanto para Wi-Fi como para GPRS, no se realizaron la itinerancia en infraestructura y re-selección de celda respectivamente.

**6.2.4.2. Análisis de resultados.** El nodo móvil multi-interfaz que en NCTUns se coloca a disposición de los usuarios del software es un dispositivo que no funciona como se espera. A pesar de que se plantea como un host que agrupa varias interfaces de red como si fueran nodos ordinarios, estas interfaces de red no se desempeñan como tal, puesto que no se genera el tráfico y el registro de paquetes, ni los procesos de itinerancia<sup>42</sup> correspondientes a las tecnologías Wi-Fi y GPRS, como en un nodo ordinario que funciona independientemente.

Esta, es la dificultad que se puede generar en este trabajo con el dispositivo móvil multi-interfaz, para realizar la simulación de un algoritmo de Handoff vertical. Este mal funcionamiento del súper nodo, conlleva a la configuración del programa que viene por defecto en la herramienta, con el fin de lograr el objetivo final de este proyecto. Sin embargo, la configuración del programa correspondiente al funcionamiento de los dispositivos presentados en NCTUns, no está dentro de la metodología propuesta para el desarrollo de esta investigación.

---

<sup>42</sup> Ibid., p. 52.

El hecho de que el súper nodo presente problemas de funcionamiento al momento de generar tráfico con otros dispositivos a través de redes Wi-Fi y GPRS usando las interfaces de red respectivas simultáneamente, no imposibilita la ejecución de un algoritmo de handoff vertical sobre la red heterogénea. En este trabajo si se realiza el cambio de conexión entre tecnologías de red diferentes, a pesar de que los procesos de itinerancia en infraestructura y re-selección de celda en Wi-Fi y GPRS, no son efectivos cuando se utiliza un nodo multi-interfaz.

### 6.3. IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO DE HANDOFF VERTICAL

El algoritmo de Handoff vertical que se planteó implementar en este punto, para la simulación de un proceso de traspaso vertical entre redes de tecnología Wi-Fi y GPRS, es una abstracción del **ALGORITMO PARA LA SELECCIÓN DE LA INTERFAZ DE RED EN EL PROCESO DE HANDOFF VERTICAL EN REDES INALAMBRICAS**, diseñado en el desarrollo del proyecto de investigación “**Desarrollo de un sistema universal para clientes con dispositivos móviles que permita portabilidad entre redes Wi-Fi / GSM-GPRS / CDMA2000 / Wi-Max**”.

En el anexo (C), se puede apreciar el diagrama de flujo del algoritmo original que se tomo como caso de estudio.

Fue necesario hacer una extracción de este algoritmo excluyendo el tema de la movilidad en el proceso, puesto que no se encontró un modelo que definiera este parámetro de manera configurable. No se implemento una forma para extraer en tiempo real de la topología de red heterogénea planteada para esta prueba, las variables de posición, distancia, velocidad y patrones de movimiento que permiten describir la movilidad del dispositivo móvil multi-interfaz, debido a que acceder a estos parámetros requiere de grandes modificaciones en el código fuente de NCTUns.

La variable de movilidad es considerada en el algoritmo de handoff vertical desarrollado por el ingeniero Oscar Wilfredo Jiménez, solo cuando la movilidad del dispositivo multi-interfaz es alta. Para situaciones en que la movilidad es baja,

esta variable se descarta del algoritmo para realizar el proceso de handoff vertical teniendo en cuenta los demás parámetros, (el ancho de banda, el costo económico y el consumo de energía). Por tal motivo, excluir el tema de la movilidad en el proceso no acarrea graves consecuencias en la ejecución del algoritmo de handoff vertical con preferencias de usuario, puesto que se considera una movilidad baja para el dispositivo multi-interfaz de red.

El algoritmo de handoff vertical que se simula en este trabajo, no se integra en la capa física de cada uno de los dispositivos de red vinculados con este proceso, si no que se codifica en una aplicación que es llamada globalmente desde la capa de red en cada nodo relacionado con el proceso.

Integrarlo en la capa física del dispositivo virtual indica cambios de hardware además de las configuraciones de software que requiere la implementación del algoritmo. Este hecho se considera como desventaja puesto que aumenta la complejidad de la implementación.

Ejecutar el algoritmo directamente desde cada dispositivo de red involucrado en el proceso no es posible, ya que NCTUns es una herramienta que realiza sus tareas secuencialmente y la ejecución directa del algoritmo en el nodo obligaría a la herramienta a trabajar el proceso de handoff vertical paralelamente en cada dispositivo, hecho tal, generaría un colapso en el funcionamiento normal del software.

A continuación, se describe en detalle el proceso de implementación del algoritmo de Handoff Vertical con preferencias de usuario, que se tuvo en cuenta para la simulación.

**6.3.1. Función de costo.** En este punto de la investigación, en la lista de operaciones a realizar para conseguir un Handoff Vertical, se contempla el complemento fundamental para el proceso de selección entre dos interfaces de tecnologías diferentes, la Wi-Fi y la GPRS. Tal complemento, es la función de costo.



$$f_i = w_b \ln \frac{1}{B_i} + w_p \ln P_i + w_c \ln C_i \quad (4)$$

**Fuente:** JIMÉNEZ CHAVARRO, Oscar Wilfredo. Algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de handoff vertical en redes inalámbricas WLAN / WWAN. Santiago de Cali: 2006. 58 p.

Esta ecuación presenta en la sección 6.2.6 del el trabajo del Ingeniero Oscar Chavarro la cual fue basada en el trabajo de H. Wang<sup>43</sup>, arroja un valor que permite evaluar las características de la red y decidir cuál es la mejor opción de conexión. Se clasifica dentro de las funciones de costo de escala relativa, puesto que el valor calculado no representa algo específico y solo tiene sentido cuando se compara con otros valores calculados.

Para la simulación del algoritmo de Handoff vertical, se comparan los valores arrojados por la función de costo que se muestra en la ecuación 4, de las redes de tecnología Wi-Fi y GPRS que componen la red heterogénea del caso de estudio.

La variable  $w$  es un factor representa el peso de cada parámetro,  $B$  indica el ancho de banda,  $P$  hace alusión al consumo de potencia, y  $C$  hace referencia al costo económico; El peso de los parámetros puede ser estático (predefinido en el modelo) o dinámico. En este último caso, será el usuario quien determine su valor dependiendo de sus preferencias.

**6.3.2. Extracción de Parámetros en NCTUns.** Los parámetros necesarios para el cálculo de la función de costo se encuentran intrínsecos en la topología de red heterogénea simulada con la herramienta NCTUns para ella. Se da participación importante a una utilidad provista por el software para extraer o asignar valores en un tiempo de simulación determinado. Tales valores son los parámetros que se manejan dentro de los módulos de los protocolos ejecutados en NCTUns, en las tecnologías de red inalámbrica involucradas en este trabajo. El System Command, utilidad a la que se hace referencia, se compone de tres comandos básicos para la

---

<sup>43</sup> H. J. Wang, R. H. Katz, J. Giese, Policy-enabled Handoffs Across Heterogeneous Wireless Networks. En: Mobile Computing Systems and Applications. Agosto, 2002, pág. 51-60.

tarea de extracción o asignación de valores: Set, que asigna valores a un nodo, módulo o puerto físico determinado<sup>44</sup>; Get, que extrae valores de un nodo, módulo o puerto físico determinado y GetAll, que extrae valores de las variables de los módulos del mismo tipo usadas en todos los puertos de todos los nodos. En el desarrollo de esta experimentación, se hace uso de los comandos Get y Set en los módulos de capa física Wphy y RadioLink<sup>45</sup> de las tecnologías Wi-Fi y GPRS, respectivamente.

### 6.3.2.1. Ancho de Banda

**6.3.2.1.1. Ancho de banda en Wi-Fi.** Que representa la cantidad de datos para la extracción de este parámetro, fue necesario realizar algunas configuraciones simples en cada uno de los módulos implicados, donde se agregaron las líneas de código mencionadas en la Tabla 6.

**Tabla 6. Configuraciones para módulo Wphy**

| Código                                 | Archivo | Concepto   |
|--|---------|--|
| #include <exportStr.h>                 | Wphy.cc | Llama al modulo que contiene las funciones que permiten escribir valores en una estructura ExpStr creada por el Dispatcher.<br>Esta estructura se almacena en un archivo txt que se ubica en la carpeta de simulación de la topología de red formada para la prueba. |
| Int bw_Mbps                            | Wphy.h  | Define de manera global la variable que contiene el parámetro a extraer. Se define como entero puesto que el <i>System Command</i> no reconoce punto flotante o números negativos.   |
| EXPORT(cur-BeamWidth, E_WONLY E_RONLY) | Wphy.cc | Macro que habilita la variable ante el motor de simulación para ser exportada y accesada en tiempo real. Aquí se   |

<sup>44</sup> No debe de confundirse con los puertos lógicos que maneja el protocolo TCP

<sup>45</sup> Wphy y RadioLink hacen referencia a los módulos que NCTUns presenta para modelar la capa física de las tecnologías Wi-Fi y GPRS respectivamente.

|                                 |        |  |
|---------------------------------|--------|--|
|                                 |        | determina el nombre de la variable a exportar y los permisos de la misma (lectura o escritura).                        |
| Int command(int, const char **) | Wphy.h | Registra de manera global la <i>function command</i> , en la cual se ejecutan los comandos del <i>System Command</i> . |

En la Tabla 6, se muestran las líneas de código incluidas en el módulo de capa física wphy, necesarios para el buen funcionamiento del System Command en el modulo.

Luego de definir la variable y los permisos, se incluyen dentro de la estructura algorítmica del *System Command* definida en cada módulo, las siguientes líneas de código:

```

if (!strcmp(argv[0], "Get")&&(argc==2)) {
    if (!strcmp(argv[1], "cur-BandWidth")) {
        ExpStr = new ExportStr(1);
        row = ExpStr->Add_row();
        column = 1;
        sprintf(tmpBuf, "%d\n",
bw_Mbps);/**Muestra lo que hay en bw_Mbps **/
        ExpStr->Insert_cell(row, column, tmpBuf, "\n");
        EXPORT_GET_SUCCESS(ExpStr);
        return 1;
    }
}
return(NslObject::command(argc, argv));
}

```

(5)

Las líneas de código expresadas en (5), permiten llamar en tiempo real el comando Get para que el dispatcher escriba en un archivo txt, la variable bw\_Mbps que hace referencia al ancho de banda del modulo wphy, ya que es en este modulo donde se incluyen estas líneas de código. El archivo en el que el dispatcher escribe la variable usando una estructura ExpStr, es almacenado en el directorio que se crea automáticamente cuando se almacena la topología de simulación creada por el usuario.

Esta estructura ExpStr usada por el dispatcher para almacenar la variable extraída por el *system commnad* usando el comando Get, dificulta la lectura desde otras aplicaciones de la variable que se almaceno en el archivo txt debido a que el End of File de esta estructura, no permite renovar el dato sobre la misma línea en el archivo.

Para simplificar la lectura de los datos extraídos por el System Command, se agrega una función de escritura que propicia la personalización del archivo donde se graba el parámetro, (ver código 6), solucionando un inconveniente adjudicado al End Of File que dificulta la lectura del último valor del parámetro extraído. Esta función de escritura es llamada desde el algoritmo general del System Command, cada vez que se solicita la participación del comando Get para exponer el valor del Ancho de Banda de cualquiera de las redes inalámbricas tenidas en cuenta para esta experimentación.

El valor del ancho de banda expuesto por esta técnica programada en el System Command, es almacenado en un archivo txt que se sitúa en una carpeta de ubicación básica<sup>46</sup> que luego será accedida por la función de lectura del algoritmo de Handoff Vertical implementado en este proyecto.

**6.3.2.1.2. Ancho de banda GPRS.** El procedimiento para escribir el valor del ancho de banda presente en la red inalámbrica de tecnología GPRS, es similar al realizado para el interfaz de red inalámbrica Wi-Fi. Se hizo uso también de los comando dispuestos por el *System Command*, especialmente del comando *Get*, para leer el valor en el modulo *RadioLink* (par del módulo Wphy) y escribirlo en un archivo txt que luego será accedido, desde el algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de Handoff Vertical en redes inalámbricas sobre NCTUns.

Le escritura de este valor se realiza haciendo el llamado desde la estructura general del *System Command*, de la función escritura dispuesta por el

---

<sup>46</sup> Carpeta creada por el programador en un lugar especificado por él mismo, la dirección de la carpeta se especifica en el código. En este proyecto, la carpeta se creó en el escritorio con el nombre "Archivo".

investigador, (ver código en 6), en el módulo *RadioLink* presente en la pila de protocolos descrita por NCTUns para simular el comportamiento de la tecnología GPRS.

```
void wphy::escritura (char *nombre, int valor) {  
    FILE *f;  
    char nombreArchivo [100];  
    strcpy(nombreArchivo,nombre);  
    f = fopen(nombreArchivo,"w");  
    char avm [33];  
    sprintf(avm,"%d",valor);  
    fprintf(f,avm);  
    fclose(f);  
}
```

(6)

El archivo en el que se escribe el valor del ancho de banda de la red inalámbrica GPRS, es creado por la función de escritura, y almacenado en el mismo directorio en que se guarda el archivo que contiene el valor del ancho de banda de la red inalámbrica de tecnología Wi-Fi.

Las líneas de código que se muestran en la Tabla 6 para el modulo Wphy, son las mismas y siguen la misma metodología para agregarlas en el modulo *RadioLink*.

**6.3.2.2. Consumo de energía.** El tema referente al consumo energético en un dispositivo de red, ha venido ganando importancia en los últimos años como consecuencia del crecimiento de las redes de telecomunicaciones, principalmente de Internet.

En los Estados Unidos, en el año 2000, se consumieron 6 TW-h de energía debido a los enrutadores (routers), conmutadores (switches) y concentradores (hubs) generando un gasto de operación alrededor de un billón de dólares por año. El consumo de energía por los mismos dispositivos, distribuidos en el mundo entero, consume electricidad arriba de 100 TW-h<sup>47</sup>. Es por ello que ha surgido una nueva tendencia en el diseño de los protocolos de comunicación, incitando a los

---

<sup>47</sup> RAVI, Kokku Upendra, SHEVADE, Nishit, SHAH, Mike y DAHLIN Harrick. Energy-efficient packet processing. Texas, 2002.

desarrolladores a configurar algoritmos con “sensibilidad” energética (*energy awareness*). El desarrollo de un algoritmo con tal característica tiene una dificultad radicada en la desinformación, puesto que es difícil encontrar una caracterización generalizada del consumo energético de los dispositivos de red, ya que este parámetro, hasta hace poco, se consideraba como un parámetro indefinible, que se relacionaba directamente con el ancho de banda.

Esa misma situación se vive dentro del grupo de investigación GITI de la UAO donde surge la propuesta de trabajar esta tesis y el i2t del ICESI<sup>48</sup>, que simular el comportamiento de un algoritmo de Handoff Vertical sobre el software libre NCTUns, ya que como parámetro relevante se proyecta incluir el consumo de batería de un dispositivo móvil que transita alrededor de dos redes inalámbricas de diferente tecnología.

**6.3.2.2.1. Modelo de consumo de energía en Wi-Fi.** Un parámetro necesario para la selección de la red por la cual transmitir o recibir datos, es el consumo de energía, que se puede generar cuando se establece un tráfico de paquetes a través de una red de tecnología Wi-Fi o GPRS, entre un servidor y un usuario que transita por el área de cobertura de las redes mencionadas.

El proceso de adquisición de este valor requirió de el uso de un modelo matemático, que permite calcularlo sin realizar grandes cambios o configuraciones en la estructura algorítmica de los módulos de capa física dispuestos por NCTUns para simular el comportamiento de las tecnologías Wi-Fi y GPRS. La modificación del funcionamiento esencial del algoritmo, implementado por defecto en los módulos del software, no es compatible con los objetivos de este proyecto.

El modelo utilizado para expresar el consumo de energía generado en el proceso de transmisión y recepción de paquetes en el interfaz de red Wi-Fi del dispositivo móvil multi-interfaz, (ver ecuación 7), permitió calcular este parámetro a partir de la extracción del tamaño de cada paquete que entra o sale del módulo de capa física

---

<sup>48</sup> Grupos de investigación participantes en el proyecto: “Desarrollo de un sistema universal para clientes con dispositivos móviles que permita portabilidad entre redes Wi-Fi / GSM-GPRS / CDMA2000 / WiMAX”.

para cada una de las interfaces de red dispuestas en el nodo multi-interfaz del usuario.

$$Energy = m \times size + b. \quad (7)$$

**Fuente:** FEENEY, Laura Marie y NILSSON, Martin. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Kista, Sweden. 2003

Este modelo de consumo de energía, orientado al tamaño del paquete que se transmite o recibe en el interfaz de red inalámbrica<sup>49</sup>, fue el modelo escogido entre otros dos que se tuvieron en consideración para determinar el parámetro de consumo de energía, necesario en la función de costo utilizada en el proceso de Handoff Vertical para esta investigación, el de Youngkyu Choi<sup>50</sup> y el de Sergiu Nedevschi<sup>51</sup>, pues se presenta como una ecuación lineal fácil de implementar, que no requiere de grandes adecuaciones en el módulo de capa física de la red inalámbrica sobre la que se trabaja.

Esta función matemática presentada en el trabajo de Feeney y Nilsson fue usada por ellos para calcular el consumo de energía por un interfaz de red inalámbrica tanto para transmisión de datos punto a punto como para transmisión por difusión (broadcast). Presenta un componente fijo asociado con el cambio de estado del dispositivo y un gasto en la adquisición del canal (b), como también, un componente incremental que es proporcional al tamaño del paquete (m). El componente fijo b, refleja en  $\mu W \cdot \text{segundo}$  el costo energético en el procesamiento del protocolo de la capa MAC y m refleja en  $\mu W \cdot \text{segundo/bytes}$  el costo de energía mientras el paquete de datos está siendo enviado.

El modelo no considera la fragmentación realizada por la capa de enlace ni tampoco el consumo generado por intentos fallidos de adquisición del canal o de

---

<sup>49</sup> FEENEY, Laura Marie y NILSSON, Martin. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Kista, Sweden. 2003.

<sup>50</sup> CHOI, Youngkyu y CHOI, Sunghyun. Service Charge and Energy-Aware Vertical Handoff in Integrated IEEE 802.16e/802.11 Networks. Korea. 2005.

<sup>51</sup> NEDEVSKI, Sergiu, POPA, Lucian y IANNACCONE, Gianluca. Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate-Adaptation. Estados Unidos: California. 2007.

mensajes perdidos debido a la colisión, bit de error o pérdida de la conexión inalámbrica. Los resultados de experimentación conseguidos por Feeney y Nilsson, confirman la precisión del modelo lineal y son usados para determinar los valores de los coeficientes  $m$  y  $b$  para varias operaciones.

Conseguir el valor que representa el tamaño de cada paquete que entra o sale del módulo Wphy, lleva al uso de de las API's<sup>52</sup> provistas en NCTUns, para facilitar el desarrollo de los proyectos emprendidos por los investigadores que incursionan en el tema de las telecomunicaciones y que utilizan como herramienta de trabajo, este software.

**Tabla 7. API's de NCTUns**

| API                                   | Concepto  |
|---------------------------------------|---|
| Pkt_getlen(), bssall_len() y data_len | Funciones que consiguen el tamaño total de un <i>Packet-Object</i> <sup>*</sup> . |
| get_nid()                             | Extrae la ID de nodo del paquete que entra o sale del modulo.                     |

Las API's expuestas en la Tabla 7, permitieron identificar el nodo donde se encuentra el paquete y el tamaño del mismo, para ser procesado por el modelo matemático. Conocer la ID<sup>53</sup> de nodo donde se está calculando el consumo de energía por paquete, garantiza que se procesen solo los paquetes que entran o salen de un dispositivo en particular, que en el caso de esta investigación es el nodo móvil multi-interfaz propuesto para la experimentación, con el algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de Handoff Vertical en redes inalámbricas sobre NCTUns.

Siguiendo con el proceso, se agregaron las líneas de código que permitieron extraer el tamaño de cada paquete que entra o sale del módulo Wphy del interfaz de red Wi-Fi del dispositivo móvil:

<sup>52</sup> Encuentre más en: The protocol developer manual for the nctuns 5.0 network simulator and emulator

<sup>53</sup> Identificación única del nodo



```

if (get_nid()==9){
consalppqt+=1.9*(p->pkt_getlen()+454;
salidaKb+=(double)p->pkt_getlen() / 1000.0;
}
(8)

if (get_nid()==9){

conenppqt+=0.50*(p->pkt_getlen()+356;
entradaKb+=(double)p->pkt_getlen() / 1000.0;

}
(9)

```

Las anteriores líneas de código se incluyeron dentro de la estructura algorítmica de las funciones 10 y 11 respectivamente, funciones expresadas dentro del módulo Wphy.cc a través de las cuales pasan todos los paquetes que transitan por la pila de protocolos que ofrece NCTUns para el moldeamiento de la tecnología Wi-Fi, (ver Figura 23).

```

int wphy::send(ePacket_ *pkt) (10)

int wphy::recv(ePacket_ *pkt) (11)

```

En el código (8), el valor 1.9 es una constante incremental hallada experimentalmente que se reemplaza por  $m$  cada vez que se va a enviar un paquete. El valor 356 es la constante que representa el consumo energético en la capa MAC, valor que reemplaza a  $b$  en la ecuación 7 cada vez que se envía un paquete.

En el código 9, el valor 0.5 es una constante incremental hallada experimentalmente que se reemplaza por  $m$  cada vez que se va a recibir un paquete. El valor 454 es la constante que representa el consumo energético en la capa MAC, valor que reemplaza a  $b$  en la ecuación 7 cada vez que se recibe un paquete.

consalppqt y conenppqt, almacenan la sumatoria de los valores arrojados por el modelo matemático 7, que calcula el consumo de energía en la transmisión o recepción de paquetes en el interfaz Wi-Fi del nodo multi-interfaz. Lo contenido en

estas variables se escribe en archivos txt que crea la función de escritura mostrada en el código 6, que se ejecuta en el modulo wphy.

**Figura 23. Pila de protocolos de tecnología Wi-Fi**



La Figura 23 muestra la pila de protocolos que componen un dispositivo móvil de red inalámbrica en NCTUns.

Dentro del módulo Wphy se maneja la información de ancho de banda, poder de transmisión, BER, canal, frecuencia, ganancia, umbrales de poder de transmisión y recepción, velocidad angular y ancho del haz, de los dispositivos de red inalámbrica Wi-Fi.

**6.3.2.2.2. Modelo de consumo de energía en GPRS.** La información relacionada con el consumo de energía en la tecnología GPRS, no es de fácil acceso. El resultado de la investigación en este sentido, no presentó gran trascendencia, puesto que no se encontró un modelo matemático bien fundamentado, que permitiera calcular de manera específica, la potencia consumida por un interfaz de red inalámbrica GPRS. Frente a esta situación desfavorable, fue necesario

implementar el mismo modelo matemático previsto para el cálculo del consumo de batería en Wi-Fi.

El criterio usado en este trabajo, proviene de la investigación realizada en el instituto de Ciencias Computacionales de Suecia<sup>54</sup>, donde se experimentó con dos diferentes dispositivos electrónicos dotados cada uno de interfaces de red inalámbrica Wi-Fi y GPRS. Ambos dispositivos corriendo el sistema operativo Windows Mobile en su segunda edición. El trabajo que se trae a colación, se encaminó a capturar las tasas de energía drenada durante los distintos modos de operación de los dispositivos, basados en el hecho de que el interfaz de red Wi-Fi o GPRS se encontrara en un estado: desconectado, ocioso<sup>55</sup> o activo.

El trabajo mencionado permite afirmar que: con las dos interfaces de red trabajando en estado ocioso, el interfaz de red GPRS consume menos energía que el interfaz de red Wi-Fi. Esta afirmación la corrobora el hecho de que las tramas de gestión utilizadas por cada tecnología difieren enormemente en tamaño. Por ejemplo, cuando un interfaz de tecnología Wi-Fi no genera tráfico con un servidor, está enviando y recibiendo constantemente un repertorio de tramas de gestión que le permiten mantener la conexión con el WAP que le ofrezca mejor señal<sup>56</sup>, (Ver Tabla 4).

En cambio, el paquete *burst* (ráfaga) que recibe un interfaz de red GPRS al transitar en estado IDLE por el área de cobertura de una BTS de la misma tecnología, no sobrepasa los 114 bits, (ver Figura 18), teniendo en cuenta que en estado IDLE, el interfaz de red GPRS solo se encuentra a la escucha de la información difundida bajo la cobertura de red de las estaciones base a su alrededor<sup>57</sup>. Ni siquiera la renovación de ubicación (proceso característico del estado STANDBY), que realiza frecuentemente el dispositivo GPRS cada vez que cambia de estación base, presenta paquetes de tamaño similar a los paquetes de gestión en Wi-Fi.

---

<sup>54</sup> Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment, Op. cit., Pág. 71.

<sup>55</sup> Estado de inactividad del dispositivo

<sup>56</sup> Proceso característico de la itinerancia en infraestructura, de la tecnología Wi-Fi

<sup>57</sup> BETTSTETTER y VÖGEL, Op. cit., p. 20.

En ese documento también se destaca que la interfaz de red Wi-Fi consume una cantidad de energía menor o comparable a la cantidad consumida por la interfaz de red GPRS en el envío de tráfico TCP relativo.

Considerando el hecho de que el interfaces Wi-Fi y GPRS envían datos TCP en un orden de 2Mbps y 25Kbps respectivamente, la Interfaz Wi-Fi consume menos energía por bit que la interfaz GPRS.

Basado en estas apreciaciones, se puede concluir que la diferencia en consumo de energía al establecer un enlace de datos con un servidor a través de una tecnología de red Wi-Fi y de una GPRS, es estrecha, y que el ahorro presentado por la última se manifiesta en ausencia de tráfico de datos con el servidor.

Para efectos de esta experimentación, se modeló el consumo de energía en GPRS haciendo uso de la misma ecuación expresada en la fórmula 7 para la tecnología Wi-Fi, pero disminuyendo hasta en un 60% el valor de  $b$  que representa el costo energético de la capa MAC en el envío y recepción de paquetes. Esto se justifica con el argumento de que la tecnología de red GPRS se consume menos energía en el proceso de gestión de control de acceso al medio, que en la tecnología de red Wi-Fi. Además, se busca una leve ventaja sobre el modelo de consumo de la tecnología Wi-Fi, que propicie un cambio de conexión hacia la red de tecnología inalámbrica GPRS cada vez que el usuario muestre un interés mayor por el parámetro de consumo de energía.

Para aplicar lo dicho, se dio paso a la implementación de las líneas de código necesarias para realizar el cálculo del consumo de energía por transmisión y recepción de paquetes, sobre el módulo *RadioLink* de la misma forma como se hizo en el módulo *Wphy*:

```
if (get_nid()==9){  
  
    consalppqtGPRS+=1.9*((double)bssall_len(bs))+187;  
    salidaKbGPRS+=(double)bssall_len(bs);  
  
}
```

(12)

```

if (get_nid()==9){

conenppqtGPRS+=0.50*((double)data_len)+138;
entradaKbGPRS+=(double)data_len;
}

```

(13)

Las líneas de código anteriores se incluyeron dentro de la estructura algorítmica de las funciones 14 y 15 respectivamente, funciones expresadas dentro del módulo RadioLink.cc a través de las cuales pasan todos los paquetes que suben y bajan en la pila de protocolos que ofrece NCTUns para el modelamiento de la tecnología GPRS.

```

int radiolink::send(ePacket_ *pkt) (14)

int radiolink::recv(ePacket_ *pkt) (15)

```

consalppqtGPRS y conenppqtGPRS, almacenan valores arrojados por el modelo matemático que calcula el consumo de energía en la transmisión o recepción de paquetes en el interfaz GPRS del nodo multi-interfaz. Lo contenido en estas variables se escribe en archivos txt que crea la función de escritura ejecutada desde la estructura algorítmica del *system command*.

Una de las grandes falencias que presenta el software de simulación, se percibe, de sobre manera, al utilizar el nodo multi-interfaz dispuesto en la interfaz gráfico de usuario. Como se mencionó anteriormente, las interfaces de red inalámbrica Wi-Fi y GPRS habilitadas en el dispositivo presentan dificultades para realizar las tareas que fácilmente ejecutarían si estuviesen trabajando de manera independiente. Cuando el nodo multi-interfaz cuenta con las dos interfaces de red generando tráfico simultáneamente con sus redes respectivas, los procesos de re-selección de celda<sup>58</sup> en GPRS e itinerancia en infraestructura en Wi-Fi, no son efectivos generando un error en la simulación de tal magnitud, que propicia la desconexión del GUI con el *Dispatcher* suspendiendo la presentación gráfica del software, poniendo en duda la robustez de la herramienta.

---

<sup>58</sup> Ibid., p.58.

Hay que agregarle a esto que, en un nodo multi-interfaz se garantiza el buen funcionamiento de cada interfaz que se habilita, copiando la misma pila de protocolos de red utilizada en las tecnologías consideradas, y relacionándolas como si se tratara de dispositivos móviles adheridos que se desplazan en una misma dirección. El *System Command* no reconoce la interfaz de red GPRS como un nodo dentro del dispositivo con dos interfaces. Por eso se recomienda que en el caso de la tecnología GPRS, se realicen los llamados de los comandos que proporciona el *System Command*, desde la BTS. Esto no perjudica los resultados de los cálculos realizados, puesto que el mismo módulo *RadioLink* se ejecuta desde todos los dispositivos de red de la misma tecnología presentes en el entorno de simulación, registrando todos los paquetes que entran y sale a la capa física de manera global en la red. Con el *get\_nid()* se asegura el procesamiento de los paquetes que transitan en el nodo de interés.

**6.3.2.3. Costo económico.** En Colombia, el mercado que se genera a partir de los servicios de comunicación que prestan las redes de área extensa es prominente. Hasta junio del 2009, según Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones<sup>59</sup>, los tres únicos proveedores de este servicio en Colombia contaban con 40'723.987 abonados activos, así que el 89.5% del total de habitantes en este país, diariamente hacen uso de de las redes de tecnología GSM/GPRS, EDGE y 3.5G. Las tarifas que los propietarios de las redes cobran por descargar 1Kbit cada segundo es Se muestra en la Tabla 8.

**Tabla 8. Tarifas descarga Kbits/s GPRS**

| Proveedor | Tarifa Kbit |
|-----------|-------------|
| COMCEL    | \$19,28     |
| MOVISTAR  | \$14        |
| TIGO      | \$12        |

Eso sin tener en cuenta que los planes que cada operador ofrece disminuye rotundamente el precio por Kbits/s. Por ejemplo, si actualmente se paga \$9000 diariamente en COMCEL, se puede navegar por Internet ilimitadamente desde

<sup>59</sup> MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Informe trimestral telefonía móvil - comparativo entre operadores. Bogotá D.C. DIRECCIÓN DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS DE COMUNICACIONES, 2009. 1 p.

cualquier dispositivo que lo permita. Si no se cuenta con un plan de servicio como el mencionado, por defecto el proveedor cobrará al usuario la información presentada en la Tabla 8.

Para determinar una tarifa de cobro en el cálculo del costo económico generado al usar los servicios de red GPRS, no se considera un plan de servicios con tarifas especiales de descarga. Consecuencia de ello, se toma una tarifa promedio entre las tres que ofrecen los proveedores de telefonía celular en Colombia. La tarifa promedio es de \$15.093 cada Kbits descargado a través de la red GPRS.

Respecto a Wi-Fi, esta variable que hace referencia al costo significaría establecer una comunicación con el servidor a través de una red inalámbrica de tecnología 802.11b. No se encontró información que indique un costo por parte del proveedor, que ponga a disposición el servicio de comunicación inalámbrica mediante el uso de WAP. El servicio de Wi-Fi generalmente se restringe brindándolo sólo a los dispositivos inalámbricos determinados por el dueño de la red, o se presta como valor agregado de otros servicios que se brindan en un negocio, sin generar ningún costo para el usuario bajo la cobertura del dispositivo WAP propiedad del negocio.

Haciendo caso de lo anterior, para esta tecnología de red se precisó igualar la variable de costo económico involucrada en la función de costo de la ecuación 4, a uno, para que al procesarlo con la función logarítmica no se generen resultados indefinidos del modelo matemático.

```
double costousoredGPRScal(double varcalcost){  
  
    double costusrGPRSKb=15.093;  
  
    if (traspaso == 1){  
        if (tiemposim > 3){  
  
            consegactinGPRS = varcalcost - consegantingPRS;  
            if (consegactinGPRS==varcalcost){  
  
                costousoactual=1;  

```

```

        }else{

            costouso = (consegactinGPRS/1000)*costusrGPRSKb
            printf("vho lo que arroja la formula costouso: $%lf\n\n",
costouso);

        }
        consegantinGPRS=varcalcost;

    }

else{
printf("El interfaz GPRS del nodo movil no se ha enganchado\n\n");

consegactinGPRS=0;
costiusoanterior=0;
costouso=1;
costousoactual=0;

    }

    }

else{
printf("No se esta generando trafico por la interfaz GPRS\n\n");

consegactinGPRS=0;
costiusoanterior=0;
costouso=1;
costousoactual=0;

    }
return (costouso);

}

```

(16)

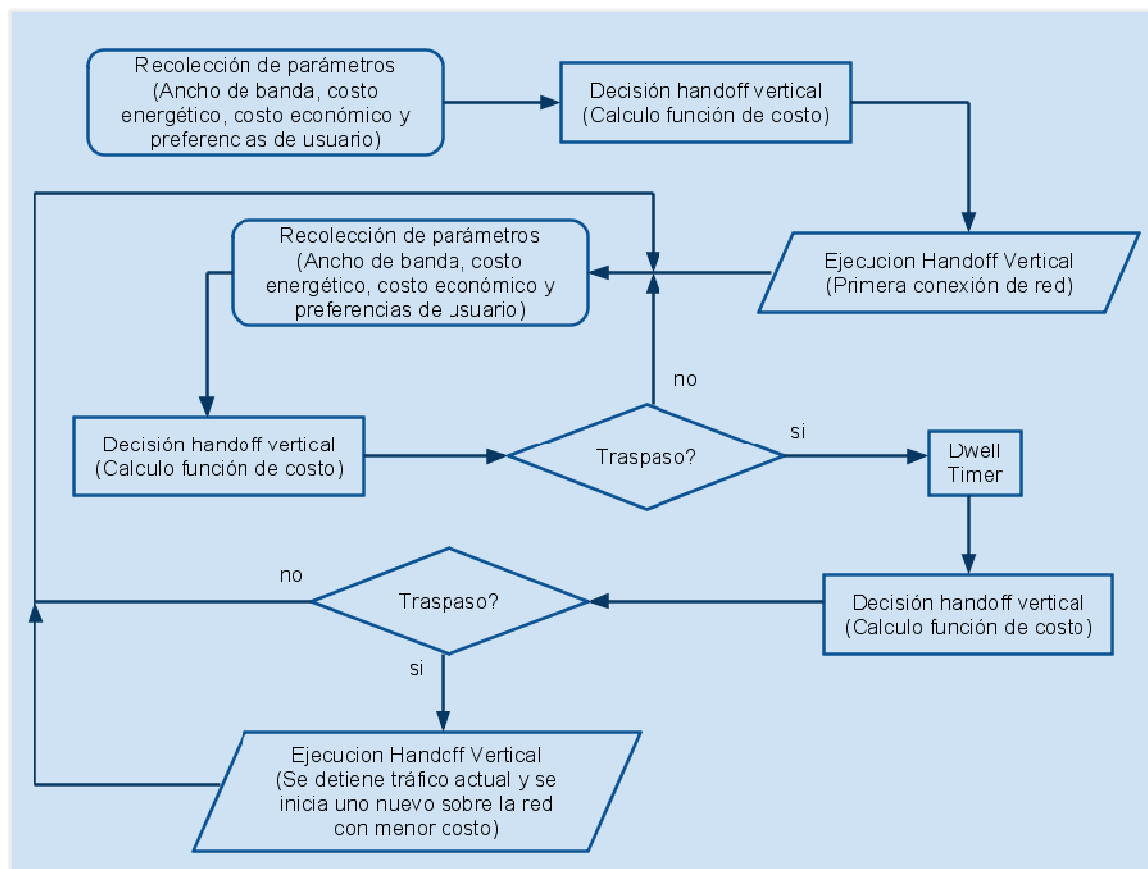
El algoritmo que ese presenta en (16), se utiliza para calcular el costo económico que genera descargar datos a través de la red GPRS. Primero se espera que el valor de traspaso sea igual a uno, lo que indica que se transferirán datos por la red GPRS. Luego se verifica que el tiempo de simulación sea mayor que 3 segundos, tiempo en el cual ya se debe de haber efectuado la agregación (*attach*) del nodo móvil a la red celular. Se toma la sumatoria total de datos descargados hasta el segundo actual y se resta con la sumatoria de datos descargados hasta el segundo anterior, para que la diferencia arroje la cantidad de datos descargados en ese segundo. Ese valor en bytes de datos descargados en un segundo, se



multiplica por la tarifa promedio de cobro que se considero en esta sección para obtener el costo de uso de la red GPRS cada segundo. Ese valor de costo de uso de la red GPRS se pone a disposición de la función de costo para que se evalúe la posibilidad de seguir conectado a la red celular.

**6.3.3. Algoritmo de Handoff vertical con preferencias de usuario.** El algoritmo de handoff vertical que se ejecuta en NCTUns para simular el proceso de traspaso de una red de tecnología de red Wi-Fi a una red de tecnología GPRS y viceversa, por parte de un dispositivo móvil equipado con las interfaces correspondientes, se presenta de manera general en la Figura 24.

**Figura 24. Diagrama de flujo de algoritmo de handoff vertical**



En primera instancia, el algoritmo descrito en la Figura 24, toma los parámetros extraídos por el *system comand* (el ancho de banda y el consumo de energía) de los módulos de capa física de cada una de las redes y junto con el costo

económico y las preferencias de usuario, los incluye en el cálculo de la función de costo descrita en la ecuación 4, calculo que se realiza para cada una de las redes Wi-Fi y GPRS, con el fin de determinar cuál es la red que genera menor costo de conexión en la prestación de su servicio. En seguida, se realiza la primera conexión de red para luego recolectar nuevamente los datos necesarios en el proceso de handoff vertical. Luego de que se recogen los valores de los parámetros nuevamente y después de haber conseguido la primera conexión, se evalúan otra vez estos datos con la función de costo para determinar si hay necesidad de realizar un traspaso de red. Si no hay traspaso se inicia el ciclo desde la recolección de parámetros después de la primera conexión. Si resulta necesario el traspaso, se activa el *Dwell Timer* para disminuir la posibilidad de que se realice un traspaso innecesario. Finalizado el tiempo en el *Dwell timer*, se toman nuevamente los parámetros de cada red y se realiza el cálculo de del costo para cada una de las redes. Si después de haber terminado el *Dwell timer* y de haber evaluado las redes se sigue presentando la necesidad del cambio de conexión de una red a otra con menor costo de conexión, se ejecuta el traspaso cambiando la conexión del dispositivo multi-interfaz hacia la red que presentó mejores condiciones. De lo contrario, se vuelve a iniciar el ciclo que empieza después de la primera conexión de red.

A continuación se presentan en pseudo código las aplicaciones que permiten conseguir un cambio de enlace de una red Wi-Fi a una GPRS y viceversa, según los resultados que arroje la función de costo presentada en la ecuación 4. En el anexo A y B, se presenta el código en lenguaje C++ de los mismos algoritmos.

- $w_1$ ,  $w_2$  y  $w_3$ : Representan preferencias de usuario.
- traspaso: almacena el valor de traspaso 0 y 1 para Wi-Fi y GPRS respectivamente
- consumoXpaquetesentranGPRS: almacena la sumatoria del consumo por paquete que entra a la interfaz GPRS del nodo multi-interfaz en  $\mu W$ .
- consumoXpaquetessalenGPRS: almacena la sumatoria del consumo por paquete que sale de la interfaz GPRS del nodo multi-interfaz  $\mu W$ .
- conXsegGPRS, conXpqWi-Fi: Almacena el valor de consumo de energía por segundo en la interfaz GPRS y Wi-Fi respectivamente.
- pqentuWaW, pqsaluWaW: almacena la sumatoria del consumo por paquetes que entran y salen de la interfaz GPRS del nodo multi-interfaz vatios.

- bytesinGPRSnm: Cantidad de bytes que entran por segundo a la interfaz de red GPRS del nodo multi-interfaz
- curGPRS: costo de uso de la red GPRS por segundo
- fcGPRS, fcWiFi: resultado de cálculo de la función de costo red GPRS y Wi-Fi respectivamente
- envio: función de envío de paquetes
- ipenvio: dirección IP destino
- puertoenvio: puerto de envío de paquetes
- textoenvio: texto de envío en el paquete
- echomax: tamaño máximo del buffer de envío
- bufferenvio: buffer de salida de paquetes
- ip1 y ip2: direcciones IP de las interfaces de red Wi-Fi y GPRS del nodo multi-interfaz
- puerto1 y puerto2: puertos lógicos de las interfaces Wi-Fi y GPRS del nodo multi-interfaz

Inicio

#### **// Bloque de inicialización de variables globales**

```

w1, w2, w3
traspaso
consumoXpaquetesentranGPRS, consumoXpaquetessalenGPRS
conXsegGPRS, conXpqWiFi
curWiFi
pqentuWaW, pqsaluWaW, consumo, consant
costusrGPRSKb, bytesinGPRSnm, curGPRS
anchobGPRSMb, anchobWiFiMb
fcGPRS, fcWiFi
ipenvio, textoenvio, puertoenvio
ip1, ip2
texto1 ← transmisión por Wi-Fi
texto2 ← transmisión por GPRS.
buff
echomax ← 255

```

#### **// Fin bloque de inicialización de variables**

#### **// Calculo consumo de batería por segundo en GPRS**

```
funcion calculobat()
```

```
pqentuWaW ← consumoXpaquetesentranGPRS/1000000
```

```
pqsaluWaW ← consumoXpaquetessalenGPRS/1000000
```

```
consumo ← pqentuWaW + pqsaluWaW
```

```
si consumo = consant entonces
```

```
conXsegGPRS ← consumo
```

```
si no
```

```
conXsegGPRS ← consumo – consant
```

```
consant ← consumo
```

```
fin si
```

```
//fin calculo consumo batería GPRS
```

```
//Calculo de costo uso red GPRS
```

```
funcion calculocost()
```

```
costusrGPRSKb ← 15.093
```

```
si traspaso = 1 entonces
```

```
curGPRS ← bytesinGPRSnm/1000*costusrGPRSKb
```

```
si no
```

```
curGPRS ← 0
```

```
fin si
```

```
// fin calculo costo red
```

```
//Decisión de traspaso
```

```
funcion decision()
```

```
fcGPRS ← w1*log(1/anchobGPRSMb) + w2*log(conXsegGPRS) + w3*log(curGPRS)
```

```
fcWiFi ← w1*log(1/anchobWiFiMb) + w2*log(conXpqWiFi) + w3*log(curWiFi)
```

```
si fcWiFi < fcGPRS entonces
```

```
traspaso ← 1
```

```
si no
```

```
traspaso ← 0
```

fin si

**//fin decisión de traspaso**

**// Función de envío**

funcion envio (ipenvio, textoenvio, puertoenvio)

si textoenvio < echomax entonces

bufferenvio  $\leftarrow$  ipenvio + puertoenvio + textoenvio

si no

bufferenvio  $\leftarrow$  0

fin si

**//fin función envío**

**//inicio main**

calculobat()

Calculocost()

decision()

si traspaso = 0 entonces

envio(ip1, texto1, puerto1)

si no

envio (ip2, texto2, puerto2)

fin si

mientras ciclo = 1 haga

calculobat()

Calculocost()

decision()

si traspaso = 0 entonces

envio(ip1, texto1, puerto1)

si no

envio (ip2, texto2, puerto2)

fin si

fin mientras

// fin función envío

Este algoritmo se integra a NCTUns almacenándolo en la carpeta /usr/local/nctuns/tools, como archivos de tipo ejecutables.

El vho.c que se configura en el servidor de paquetes (host 5), (vea Figura 25), Este toma las preferencias de usuario y los parámetros presentes en las redes Wi-Fi y GPRS; como: ancho de banda, consumo de potencia y cantidad de paquetes enviados y recibidos en la red GPRS; y realiza el cálculo del costo que representa generar tráfico de datos a través de cada una de las redes. Costos que luego son comparados para determinar la mejor opción de conexión.

Después de conocer cuál de las dos redes se acerca más a lo que el usuario desea de la red, por la cual quiere iniciar un tráfico de paquetes, el vho.c inicia un envío de paquetes desde el nodo móvil, a la interfaz seleccionada como mejor opción de conexión.

El servidor.c que se configura en cada una de las interfaces de red habilitadas en el nodo móvil multi-interfaz, coloca al dispositivo a la espera de los paquetes de datos provenientes del servidor. Cada vez que ingrese un dato al nodo, el servidor.c registrará el suceso y enviará un mensaje de respuesta confirmando el arribo del paquete.

**6.3.4. Configuración de topología para validación.** La topología que fue diseñada para simular el proceso de Handoff Vertical se presenta en la Figura 25. Esta topología de red es diferente de la que se plantea en la Figura 21, puesto que en esta sección se pretende realizar la simulación del algoritmo de handoff vertical con preferencias de usuario, que se tomo como caso de estudio para este trabajo lo que conlleva a vincular las dos tecnologías de red inalámbrica en una sola estructura de red cableada. La simulación se hace efectiva al combinar las dos tecnología de red inalámbrica conectando los dispositivos de radio difusión de cada tecnología, a un host fijo servidor de paquetes que generara tráfico hacia el

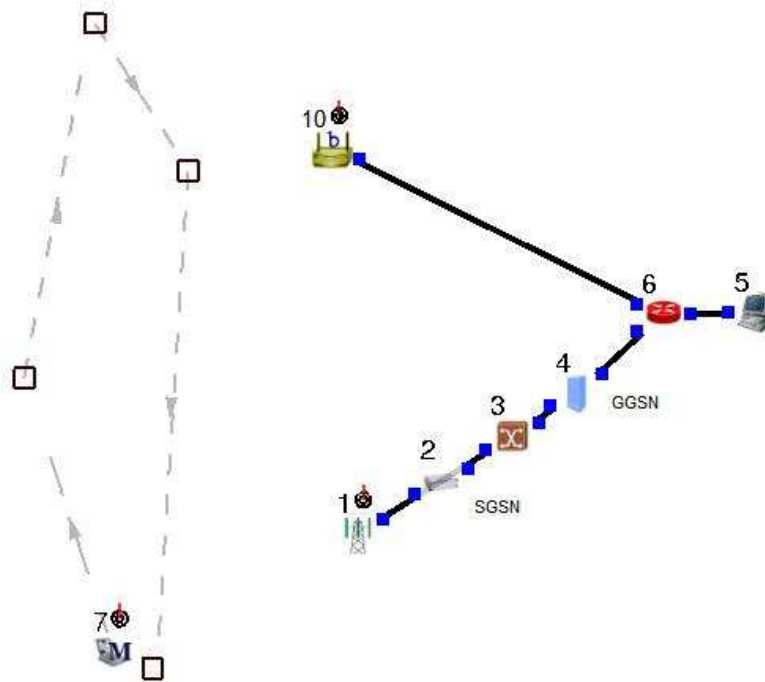
dispositivo multi-interfaz a través de la red que presente menor costo de conexión y se acerque más a las preferencias dictadas por el usuario del dispositivo móvil, con el fin de que en cualquier momento de la simulación se traspase de una red a otra según las condiciones del enlace, pero que se siga generando tráfico entre el host fijo y el nodo móvil. En la sección 6.2.3., solo se hizo uso de las redes Wi-Fi y GPRS para comprobar el funcionamiento del nodo multi-interfaz en un ambiente heterogéneo.


El modulo *wphy* es el único al que se le realizan configuraciones de código, ya que en este se encuentran todos los parámetros necesarios para el proceso de handoff vertical que se tomo como caso de estudio. Este modulo es utilizado por los nodos de tecnología Wi-Fi para representar su capa física. Por *wphy* pasan todos los paquetes que entran y salen a todos los dispositivos de red Wi-Fi y para poder experimentar con los paquetes de un nodo específico, se hace uso del comando *get\_nid()* expuesto en la Tabla 7.

Las direcciones IP de los terminales que componen la topología heterogénea de la Figura 25 son:

- 1.0.4.2 para la interfaz de red Wi-Fi en el nodo multi-interfaz.
- 1.0.1.2 para el interfaz de red GPRS en el nodo multi-interfaz.
- 1.0.3.1 para el host 5.

**Figura 25. Topología de red heterogénea**

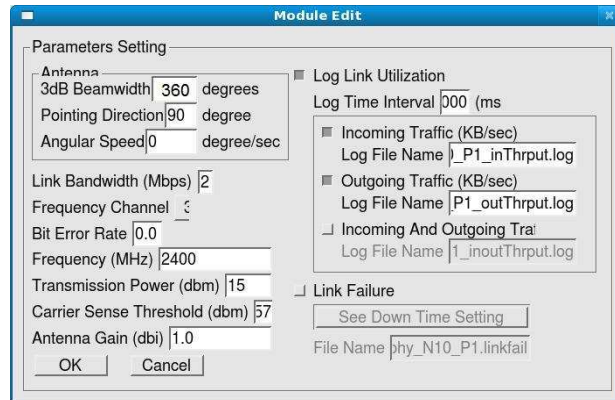


El nodo multi-interfaz se desplaza a velocidad constante siguiendo la ruta marcada en gris, permitiéndole al dispositivo transitar por el área de cobertura de las estaciones base presentes en la topología. Las interfaces de red habilitadas en el súper nodo, formaron subredes inalámbricas usando la herramienta de selección de nodos inalámbricos ( ) , con las estaciones base correspondientes a su tecnología.

Las tasas de transmisión que se configuraron en las redes de tecnología Wi-Fi y GPRS, son del orden de los 2 Mb y 30 Kb, respectivamente. Para cada módulo de capa física se determinaron los valores de ancho de banda, como se muestra en la Figura 26, ejemplo para el módulo Wphy del súper nodo.



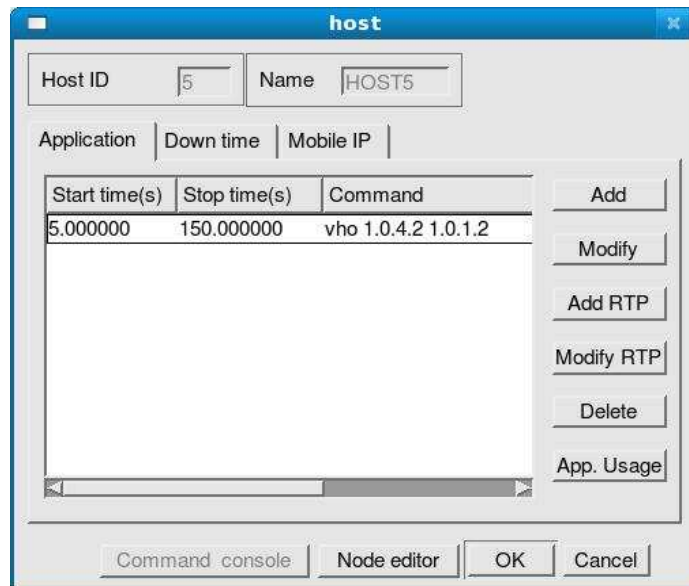
**Figura 26. Wphy súper nodo**



La Figura 26, muestra la ventana de configuración del modulo *Wphy* (capa física) de la pila de protocolos para la tecnología de red WI-FI donde es necesario resaltar, la posibilidad que ofrece ésta de modificar el valor de ancho de banda del interfaz de red Wi-Fi del dispositivo multi-interfaz.

Sobre el nodo 5 que desempeña la función de servidor de paquetes, se configura el vho para generar tráfico de paquetes con el nodo 7.

**Figura 27. Configuración de vho**



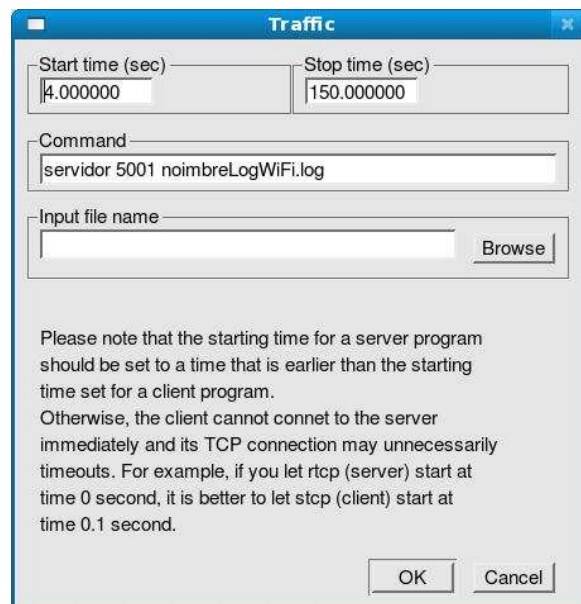
La Figura 27 muestra el llamado que se hizo al vho.c desde la ventana de tráfico del host 5, utilizando el comando vho 1.0.4.2 1.0.1.2. Las direcciones IP inscritas en el comando hacen referencia a las interfaces de red habilitadas en el súper nodo. Lo que significa que después de tomar la decisión de mejor conexión, se iniciará el envío de paquetes a una de esas dos direcciones IP.

**Tabla 9. Comandos para ejecución de servidor.c**

| Comando                         | Tecnología del interfaz | Concepto  |
|---------------------------------|-------------------------|---|
| servidor 5001 nombrelogWiFi.log | Wi-Fi                   | Comando que llama la aplicación servidor.c especificando el puerto para entrada de paquetes y el archivo de registro de paquetes que entran a la interfaz |
| servidor 5002 nombrelogGprs.log | GPRS                    |   |

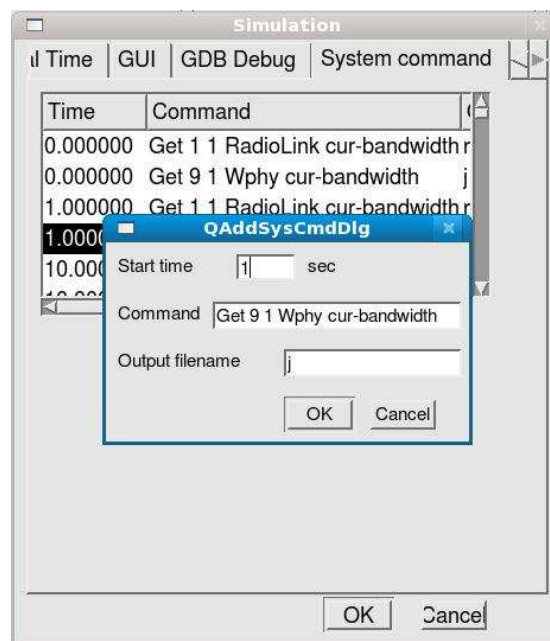
En cada una de las interfaces de red del nodo multi-interfaz se ingresaron los comandos escritos en la Tabla 9. Ejemplo visible se presenta en la Figura 28, donde se configuró la ejecución del servidor.c para el interfaz de tecnología Wi-Fi en la ventana de tráfico del nodo 7.

**Figura 28. Llamado a servidor.c en el interfaz de red Wi-Fi en el nodo 7**



La Figura 28 muestra la configuración de la aplicación servidor.c en el interfaz de red Wi-Fi. Siguiendo con la implementación del algoritmo, se hizo uso importante del *System Command*, que estructura una utilidad dispuesta en NCTUns para la extracción de los parámetros de red presentes en los módulos proporcionados por la herramienta de simulación, para la recreación de las capas del modelo de interconexión de sistemas abiertos (OSI) de cada tecnología.

**Figura 29. System Command**



Para mostrar el panel de configuración del *System Command* que se observa en la Figura 29, fue necesario seguir la ruta *G\_Setting/Simulation/System Command*. En este panel se configura el llamado a cada comando del *System Command*, donde se debe determinar el comando a utilizar, el ID del nodo donde se aplica el comando, el puerto físico de la interfaz<sup>60</sup>, el módulo de la pila que describe la capa OSI concerniente a la tecnología de la interfaz, Ver Figura 23, y el parámetro a extraer o a asignar del módulo.

<sup>60</sup> Ibid., p.52.

La extracción o asignación de valores a las variables de los módulos puede hacerse las veces que sea necesario. Teniendo en cuenta que el *System Command* no reconoce punto flotante, la mínima unidad de tiempo permitida para ejecutar un comando, de esta utilidad, es un segundo.

En la Figura 29, se muestra la configuración realizada al *System Command* para extraer de los dos módulos de capa física en las interfaces del súper nodo, Wi-Fi y GPRS, el parámetro de ancho de banda. Y en el momento pertinente asignarle un valor a esa variable para efectos de la simulación.

Cumplidas estas configuraciones en la topología de red heterogénea diseñada en la interfaz gráfica de usuario (GUI) de NCTUns, la simulación queda lista para ser ejecutada y permitir observar el comportamiento del algoritmo de Handoff Vertical implementado en la investigación.

#### **6.4. PRUEBA Y VALIDACION DE AMBIENTE SIMULADO**

Se verificó el funcionamiento del algoritmo de Handoff Vertical implementado en la herramienta de simulación NCTUns, suponiendo un ambiente cambiante, con el fin de provocar el traspaso de conexión de una red a otra con diferente tecnología.

Cabe resaltar la necesidad de esta verificación puesto que NCTUns presentó muchos inconvenientes de implementación, que en principio incitaron al autor, a dudar de la robustez del software y que, en su momento, alejaron la posibilidad de realizar la implementación del algoritmo sobre esta herramienta de simulación.

Supóngase que, una persona se encuentra manipulando un dispositivo de telecomunicaciones equipado con dos interfaces de red, Wi-Fi y GPRS, descargando información de un servidor web y no ha dado importancia alguna al ancho de banda, consumo energético y costo de uso de la red. La persona se encuentra en el área de cobertura de dos redes inalámbricas, Wi-Fi y GPRS.

Suposiciones:

- En el equipo está funcionando el algoritmo de Handoff Vertical implementado en este proyecto.
- La persona cuenta con los requerimientos de suscripción que solicita el proveedor propietario de la red GPRS que presenta la cobertura.
- La persona no está suscrita a ningún plan de datos con el proveedor del servicio GPRS al que tiene acceso<sup>61</sup>.
- El servicio de Wi-Fi que se presta en el área de cobertura de la red, es gratis.

El coordinador de NCTUns que administra todos los procesos de la herramienta, muestra segundo por segundo el desenvolvimiento de la simulación que se está ejecutando sobre el software.

---

<sup>61</sup> Se hace esta suposición debido a que es necesario generar una tarifa de cobro por Kbit descargado, ya que en un plan de datos no se generaría esa tarifa.

**Figura 30. Primera transmisión**

```

Terminal
Archivo Editar Ver Terminal Solapas Ayuda
tiemposim VH0: 4.000000 segundos

Consumo energia total trafico WiFi: 101571.000000 mW

GPRS paquetes que entran: 0.840000 Kb
GPRS paquetes que salen: 10.764000 Kb

GPRS consumo por paquetes que entran: 8.700000 mW
GPRS consumo por paquetes que salen: 42.330600 mW
GPRS consumo total por trafico paquetes: 51.030600 mW

No se esta generando trafico por la interfaz GPRS
lo que arroja la funcion de costo GPRS: 0.531228
lo que arroja la funcion de costo WiFi: -2.980144
Valor Inicial Traspaso: 0
finish
Current Time: 5.00 sec Event#: <Insert:3422, Dequeue:3422, Rest:80>
Entro al command en GPRS
Tiempo corriente en GPRS: 5.000000 segundos

Ancho de banda GPRS: 30 Kb

Entro al command en WiFi
Ancho de banda WiFi: 2 MB

WiFi tiempo corriente: 5.000000

WiFi Bytes que entran al nodo: 7.532000Kb
WiFi Bytes que salen del nodo: 3.069000Kb
WiFi consumo de energia por paquetes de entrada: 68.914000mW
WiFi consumo de energia por paquetes de salida: 54.409100mW
WiFi consumo total de energia: 123.323100 mW

Recibido en Nodo Movil: Tx PRIMERA a WIFI
Handling client 1.0.3.1
Recibido en Emisor: Tx PRIMERA a WIFI
entre al do de vho
5
tiemposim VH0: 5.000000 segundos

```

Debido a que la persona no ha manifestado ninguna preferencia por algún parámetro de la red, la primera transmisión de datos, cuando se ejecuta el algoritmo de handoff vertical, es a través de la red inalámbrica Wi-Fi, como se observa en la Figura 30, ya que el ancho de banda con que cuenta esta red es mayor en gran proporción, que el mismo parámetro presente en la red GPRS. Esto obliga a la función de costo a reflejar una favorabilidad por la red inalámbrica de tecnología Wi-Fi al momento de comparar los resultados de su cálculo, (ver Tabla 10).

**Tabla 10. Resultados Función de costo primer envío**

| Resultaos función de costo |       |
|----------------------------|-------|
| Red GPRS                   | 0.53  |
| Red Wi-Fi                  | -2.98 |

Suponga ahora que el usuario presenta un interés por el parámetro de consumo de energía y decide asignarle un valor de 3, a la variable de preferencia correspondiente a ese parámetro, (vea ecuación 4).

Para asignar valores a las variables que representan las preferencias de usuario, se creó una aplicación sencilla mostrada en (17), que se ejecuta desde consola y solicita desde el terminal, los valores de w1, w2 y w3 para almacenarlos en tres diferentes archivos txt que luego son leídos por la aplicación vho.c. Esta aplicación se almacena en la misma ubicación donde se guardan los archivos txt designados por w1, w2 y w3.

```
#include <iostream>
#include <fcntl.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <assert.h>
#include <sys/stat.h>
#include <unistd.h>
#include <fstream>
using namespace std;

int main (){

printf("Preferencias de usuario para algoritmo de handoff
vertical\n\n");
printf("Ingrese los valores de peso que desea para ancho de banda,
\n");
printf("consumo de energia y costo uso de red,
respectivamente;\n");
printf("valores que se tendren en cuenta en la decision de cambio e
red\n\n\n");

printf("1 minimo y 5 maximo\n\n\n");

    int i;
    int a;
    int f;
    // char direc = "example.txt";
    cout << "Por favor ingrese el peso que desea asignarle al ancho de
banda: ";
    cin >> i;
    ofstream myfile;
    myfile.open ("anchobndausuario.txt");
    myfile << i;
    myfile.close();
```

```

    cout << "Por favor ingrese el peso que desea asignarle al consumo de
energia: ";
    cin >> a;
    ofstream myotherfile;
    myotherfile.open ("consumobateriausuario.txt");
    myotherfile << a;
    myotherfile.close();

    cout << "Por favor ingrese el peso que desea asignarle al costo uso de
red: ";
    cin >> f;
    ofstream mythreefile;
    mythreefile.open ("costousoredusuario.txt");
    mythreefile << f;
    mythreefile.close();

printf("\n\n\n");
printf("Los valores que usted ingreso son:\n\n");
printf("Ancho de banda: %u      consumo de energia %u      costo uso red %u
\n\n\n", i, a, f);

/* cout << "The value you entered is " << i;
   cout << " and its double is " << i*2 << ".\n";*/
return 0;
}

```



Figura 31. Traspaso a GPRS



```
Terminal
Archivo Editar Ver Terminal Solapas Ayuda
RLC RecvBuf: insert duplicated block with BSN = 5 pkt_ts =150201130
Entro al command en WiFi
Ancho de banda WiFi: 2 MB

WiFi tiempo corriente: 16.000000

WiFi Bytes que entran al nodo: 31.264000Kb
WiFi Bytes que salen del nodo: 22.597000Kb

WiFi consumo de energia por paquetes de entrada: 300.788000mW
WiFi consumo de energia por paquetes de salida: 276.744300mW
WiFi consumo total de energia: 577.532300 mW

Entro al command en GPRS
Tiempo corriente en GPRS: 16.000000 segundos

Ancho de banda GPRS: 30 Kb

esperando tiempo en dwell timer traspaso de WiFi a GPRS

Se cumplio tiempo en dwell timer, se evaluan nuevamente las redes

who lo que arroja la formula costoso: $12.678120
lo que arroja la funcion de costo GPRS: -5.368456
lo que arroja la funcion de costo WiFi: -3.971667
Valor Traspaso: 1
node [0]: DTCB enqueue pkt no. 0 bsn[6:7] p ts=165021260
DTCB: tick = 165021260 MS TCB: rcv pdu [6:7]
node [9]: Llc rcv pkt no. 0 packet
Recibido en Nodo Movil: Tx a GPRS
Handling client 1.0.3.1
Recibido en Emisor: Tx a GPRS
entre al do de who
Current Time: 16.00 sec Event#: <Insert:1831, Dequeue:1833, Rest:85>
Entro al command en WiFi
Ancho de banda WiFi: 2 MB

WiFi tiempo corriente: 17.000000
```

En la Figura 31, se observa el cambio en los resultados generados a partir del cálculo de la función de costo en cada red inalámbrica. El interés del usuario por el consumo de energía propicia que se traspase la conexión de red, de Wi-Fi a GPRS, permitiéndole al nodo cliente seguir enlazado con el servidor. La Tabla 11 muestra los resultados de la función de costo que propiciaron el traspaso de la red Wi-Fi a GPRS debido a la preferencia del usuario del nodo móvil por la variable de consumo de batería de su dispositivo. Cada vez que el algoritmo determina que debe ejecutar el traspaso de una red a otra, se activa un contador de tiempo denominado *Dwell Timer* que obliga a que la comunicación se siga dando por la misma red mientras transcurren 3 segundos, para luego culminado este tiempo, se evalúan nuevamente las condiciones de las redes para ratificar la necesidad de cambio de conexión. En la Figura 31 se puede observar el mensaje que indica la culminación del tiempo de *Dwell Timer*.

Cada vez que un paquete es enviado hacia el súper nodo, éste registra el arribo del paquete a su interfaz con el **Recibido En Nodo Móvil** (ver Figura 31) y envía un paquete de respuesta que sigue la misma ruta del primero y se confirma la llegada del paquete al emisor con el **Recibido en Emisor**.

**Tabla 11. Resultados Función de costo primer traspaso**

| Resultaos función de costo |       |
|----------------------------|-------|
| Red GPRS                   | -5.36 |
| Red Wi-Fi                  | -3.97 |

En la Figura 32, se considero una disminución considerable en el ancho de banda de la red GPRS que provoca la re-conexión del nodo multi-interfaz con la red Wi-Fi, a pesar que el usuario mantiene su preferencia por el parámetro de consumo de energía.

**Figura 32. Segundo traspaso**

```

Terminal
Archivo Editar Ver Terminal Solapas Ayuda
GPRS consumo total por trafico paquetes: 206.850600 mW

Entro al command en WiFi
Ancho de banda WiFi: 2 MB

WiFi tiempo corriente: 22.000000

WiFi Bytes que entran al nodo: 43.298000Kb
WiFi Bytes que salen del nodo: 45.421000Kb

WiFi consumo de energia por paquetes de entrada: 473.057000mW
WiFi consumo de energia por paquetes de salida: 476.285900mW
WiFi consumo total de energia: 949.342900 mW

Entro al command en GPRS
Tiempo corriente en GPRS: 22.000000 segundos
esperando tiempo en dwell timer traspaso de GPRS a WiFi

Se cumplio tiempo en dwell timer, se evaluan nuevamente las redes

Ancho de banda GPRS: 3 Kb

lo que arroja la funcion de costo GPRS: 1.081868
lo que arroja la funcion de costo WiFi: -2.586037
Valor Traspaso: 0
Recibido en Nodo Movil: Tx a WIFI
Handling client 1.0.3.1
Recibido en Emisor: Tx a WIFI
entre al do de vho
22
tiemposim VHO: 22.000000 segundos

GPRS paquetes que entran: 6.720000 Kb
GPRS paquetes que salen: 33.164000 Kb

GPRS consumo por paquetes que entran: 69.600000 mW
GPRS consumo por paquetes que salen: 137.250600 mW
GPRS consumo total por trafico paquetes: 206.850600 mW

Current Time: 23.00 sec Event#: <Insert:3493, Dequeue:3493, Rest:44>
  
```

Debido a las condiciones de la red GPRS, nuevamente se presenta un traspaso de conexión inalámbrica hacia la red Wi-Fi. El hecho de que se haya disminuido el ancho de banda de esa manera en la red celular, ocasiona para la misma, un aumento en el valor de costo calculado por la ecuación de costo como se muestra en la Tabla 12, que se materializa con la pérdida del enlace a través de la red

GPRS. En la Figura 32 se puede observar nuevamente el mensaje de culminación del tiempo en el *Dwell Timer* para evitar handoff innecesarios.

**Tabla 12. Traspaso hacia red GPRS**

| Resultaos función de costo |       |
|----------------------------|-------|
| Red GPRS                   | 1.08  |
| Red Wi-Fi                  | -2.58 |

Los resultados de la implementación obtenidos en este punto de la investigación, permitieron verificar el funcionamiento del algoritmo de Handoff Vertical que se usó como caso de estudio, ya que en diferentes estados de la red se presentaron los cambios de conexión coherentes con las condiciones de la red heterogénea.

La prueba de funcionamiento del algoritmo de handoff vertical con preferencias de usuario es satisfactoria puesto que, se simula el proceso de traspaso de una red a otra por parte de un dispositivo multi-interfaz, permitiendo observar las condiciones de la red y los resultados arrojados por la función de costo, lo cual deja analizar el proceso de handoff vertical y el comportamiento de las tecnologías de red incluidas. Esto es posible puesto que la herramienta de simulación y el sistema operativo son de licencia pública y no presentan restricciones, que si se presentan en un sistema operativo de licencia comercial como el que se uso en la prueba de entorno real del algoritmo de handoff vertical tomado como estudio.

Tomando en cuenta los criterios de prueba seguidos por el ingeniero Oscar Wilfredo Jiménez Chavarro en su trabajo:

- La selección de la interfaz de red se da en el momento justo.
- No suceden procesos de handoff innecesarios.
- La red seleccionada se ajusta a los parámetros de configuración del usuario (preferencias).

Se ratifica la favorabilidad de los resultados puesto que para la selección del la interfaz de red, el algoritmo de handoff vertical simulado inicia inmediatamente el proceso de re-selección de red cada vez que las condiciones de la conexión actual son desfavorables para el usuario según las preferencias del mismo. No suceden procesos de handoff innecesarios, ya que siempre que se inicia el proceso de re-selección de red se hace espera de un tiempo determinado por el *Dwell Timer* (específicamente 3 segundos) si cambiar de conexión, evaluando nuevamente las condiciones de la red actual para que luego que se termine este tiempo realizar el cambio de red evitando la ejecución de handoff innecesarios (ver Figura 31 y Figura 32). La red seleccionada se ajusta a los parámetros de configuración del usuario, ya que a partir de las preferencias que el usuario tenga para estos parámetros, cambia la opción de selección del interfaz de red como se observa en la Figura 31.

## 7. CONCLUSIONES

NCTUns es una herramienta de simulación que presenta grandes potencialidades para la experimentación en redes inalámbricas, especialmente en redes de tecnología 802.11. Recrea hasta 6 tecnologías de red inalámbrica, facilitando la investigación en proyectos relacionados con el tema de Handoff Vertical debido a que permite simular topologías de red que en la vida real serían muy complejas de desplegar para utilizarlas en experimentaciones. Es una herramienta muy flexible porque permite amplias configuraciones en su código fuente para la implementación de algoritmos tan complejos como el de handoff vertical para pruebas de análisis y afinación, pero presenta una desventaja notable ya que no es una herramienta concurrente puesto que no permite la ejecución en paralelo de las aplicaciones que hacen parte del proceso de simulación.

La tarea de aprendizaje en el manejo de NCTUns para la simulación de las topologías de red planteadas en este proyecto, presentó grandes inconvenientes al momento de experimentar con la red de tecnología GPRS. En el tiempo que duró la exploración del software, la curva de aprendizaje fue empinada al comienzo de la experimentación debido al trabajo sobre la tecnología Wi-Fi, con la cuál se presenta un desempeño alto por parte de la herramienta de simulación. Luego la curva se torno cada vez más lenta, puesto que se incurrió en la experimentación con la tecnología GPRS y el nodo multi-interfaz, los cuales presentan grandes problemas de implementación que dificultan la obtención de resultados coherentes con la teoría planteada para los mismos.

La información correspondiente a la implementación de nuevas aplicaciones sobre NCTUns, dispuesta por los desarrolladores de la herramienta, no fue suficiente para resolver algunos problemas presentados en el desarrollo de este proyecto. En el foro disponible en la página web de los creadores de NCTUns, se limitan a colaborar con problemas de instalación y de entorno gráfico, y en los manuales oficiales que describen el trabajo sobre la herramienta, esta incompleta la información respecto a la implementación de nuevas aplicaciones sobre el software. Es por eso que se considera un aporte valioso el hecho de que en este trabajo se configura una aplicación que no viene por defecto en el contenido de la herramienta dispuesta por los desarrolladores, además de que no se encontró

registro alguno de trabajos en el tema de handoff vertical utilizando NCTUns como herramienta de simulación.

El presente proyecto permitió abordar temas complejos que se han convertido en fundamentales para el desarrollo de nuevas aplicaciones de redes de datos. Entre ellos está el consumo de batería en los dispositivos inalámbricos de comunicación, puesto que los nuevos equipos de cómputo y comunicación presentan una tendencia en la disminución del tamaño que requiere de componentes más eficientes que alarguen el tiempo de vida del dispositivo.

La información concerniente al consumo de energía que presenta un dispositivo inalámbrico de comunicaciones es de difícil acceso. Gran mayoría de los trabajos disponibles en Internet, en especial para GPRS, presentan un costo monetario para la adquisición de los mismos. Esto representa un inconveniente para los investigadores que incursionan en el tema de las telecomunicaciones, puesto que se limita la información, dificultando el proceso de exploración.

El progreso de las telecomunicaciones en cuanto al proceso de Handoff Vertical promete grandes mejoras para las tecnologías inalámbricas de comunicación. Algoritmos que permitan la integración de redes con diferentes características llevarán a los procesos de intercambio de datos a niveles inimaginables, donde la cobertura de la red inalámbrica ya no será un impedimento para mantener un enlace constante a través del mundo.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

BATES, Regis J. Broadband telecommunications handbook: VPNs, 3G Wireless, GPRS, MPLS, VoIP and SIP. 2 ed. United States of America: McGraw-Hill, 2002. 590.

BARGH, M.S. y PEDDEMORS, A.J.H. Towards an Energy-Aware Network Activation Strategy for Multi-Homed Mobile Devices. Holland. 2001.

BETTSTETTER, Christian, VÖGEL, Hans-Jörg y EBERSPÄCHER, Jörg. GSM PHASE 2+ GENERAL PACKET RADIO SERVICE GPRS: architecture, protocols, and air interface. En: Surveys. IEEE communications, 1999, vol. 2, no. 3, p. 2-14.

CHAPLIN, Kevin. Wireless LANs vs. Wireless WANs En: White Paper: Defining Wireless LANs and WANs. Noviembre, 2002, vol. 2130273. No. 1.0, p. 1-2.

CHOI, Youngkyu y CHOI, Sunghyun. Service Charge and Energy-Aware Vertical Handoff in Integrated IEEE 802.16e/802.11 Networks. Korea. 2005.

CCNA Exploration, aspectos básicos de networking [CD-ROM]. Washington: CISCO System, 2009. Ethernet:

Diseño de un "Backbone" inalámbrico utilizando tecnología WiMAX, para la integración de puntos de acceso WiFi de diferentes proveedores en el Distrito Metropolitano de Quito y propuesta para ofrecer multi-servicios. Trabajo de grado Ingeniero electrónico y de telecomunicaciones. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Escuela de ingeniería. 2006. 189 p.

FEENEY, Laura Marie y NILSSON, Martin. Investigating the energy consumption of a wireless network interface in an ad hoc networking environment. Kista, Sweden, 2003.

GÁLLEGO MARTÍNEZ, José Ramón, HERNÁNDEZ SOLANA, Ángela. Laboratorio de Telemática, Universidad de Zaragoza. Zaragoza, 2004. 1 archivo de computador.

GATTINE, kara. Mobile computing definitions [en línea]: handoff. needham: thechtarget, 2009 [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: [http://searchmobilecomputing.techtarget.com/sDefinition/0,,sid40\\_gci335123,00.html](http://searchmobilecomputing.techtarget.com/sDefinition/0,,sid40_gci335123,00.html)

IEEE 802.21 [en línea]: Estados Unidos. IEEE 802, [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.ieee802.org/21/>

IEEE 802.11b Wireless LANs Wireless Freedom at Ethernet Speeds. Santa Clara, CA 2003. 1 archivo de computador.

Introducción a Wi-Fi (802.11 o WiFi) [en línea]: Tunez. Communitic International, 2008 [consultado 12 de enero de 2010]. Disponible en Internet: <http://es.kioskea.net/contents/wifi/wifiintro.php3>

JIMÉNEZ CHAVARRO, Oscar Wilfredo. Algoritmo para la selección de la interfaz de red en el proceso de handoff vertical en redes inalámbricas WLAN / WWAN. Trabajo de grado Ingeniero Informático. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente. Facultad de Ingeniería, 2006. 58 p.

MINISTERIO DE TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES. Informe trimestral telefonía móvil - comparativo entre operadores. Bogotá D.C. DIRECCIÓN DE ADMINISTRACIÓN DE RECURSOS DE COMUNICACIONES, 2009. 1 p.

NCTUns [en línea]: Taipei, SIMREAL TECHNOLOGY, 2002 [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://nsl10.csie.nctu.edu.tw/>



NEDEVSCI, Sergiu, POPA, Lucian y IANNACCONE, Gianluca. Reducing Network Energy Consumption via Sleeping and Rate-Adaptation. Washington: California. 2007.

RAVI, Kokku Upendra, SHEVADE, Nishit, SHAH, Mike y DAHLIN Harrick. Energy-efficient packet processing. Texas, 2002.

MILLAN, Andrés Felipe, NAVARRO, Andrés, GARCIA, Alexander, ZUÑIGA, Claudia, CESPEDES, Sandra, SOLARTE, Zeida María, TAMURA, Gabriel, JIMENEZ, Oscar Wilfredo. Sistema universal para portabilidad de dispositivos móviles en un ambiente de redes inalámbricas heterogéneas. 1 ed. Santiago de Cali: Universidad Autónoma de Occidente, 2008. 256.

Understanding 802.11 Frame Types [en línea]: Management Frames. Washington: Wi-Fi PLANET, agosto 15 del 2002 [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.wi-fiplanet.com/tutorials/article.php/1447501>

Unlicensed mobile access (UMA) [en línea]: Washington. NOKIA, [consultado 06 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://www.nokia.co.uk/find-products/technologies/uma#What%20is%20UMA??>

WANG, Shie-Yuan, CHOU, Chih-Liang, LIN, Chih-Che y HUANG, Chih-Hua. The protocol developer manual for the nctuns 5.0 network simulator and emulator. Taipei, 2008.

WANG, Shie-Yuan, CHOU, Chih-Liang y LIN, Chih-Che. The gui user manual for the nctuns 5.0 network simulator and emulator. Taipei, 2008.

WANG, Shie-Yuan; LIAO, Kuo-Chiang. Innovative network emulations using the nctuns tool. Taipei 2006.

Wireless Wide Area Network [en línea]: San Diego. Wikimedia, 2009 [consultado 29 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless\\_Wide\\_Area\\_Network](http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_Wide_Area_Network)

WPAN (Wireless Personal Area Network) [en línea]: Tunez. Communitic International, 2008 [consultado 29 de noviembre de 2009]. Disponible en Internet: <http://es.kioskea.net/contents/wireless/wpan.php3>

## 9. ANEXOS

### Anexo A. Algoritmo de handoff vertical en lenguaje C++ (vho.c)

```
// INICIO BLOQUE DE INCLUDE

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/socket.h>
#include <netinet/in.h>
#include <arpa/inet.h>
#include <netdb.h>
#include <ctype.h>
#include <errno.h>
#include <time.h>
#include <netinet/tcp.h>
#include <string.h>

#define ECHOMAX 255

// FIN BLOQUE DE INCLUDE

// INICIO BLOQUE DE INICIALIZACION DE VARIABLES GLOBALES

int w1, w2, w3; // preferencias de usuario
int traspaso; // entero de decision
int anchobandaWiFiKb;
int anchobandaGPRSKb;

double consumoxpaketewifi;
double consumoWiFiXsegundoant=0, consumoWiFiXsegundo, consumoXsegundoGPRS;
double entranbytesGPRS, salenbytesGPRS, tiemposim=0, histeresis=1;
double contransBytesGPRSuW=0, conrecepBytesGPRSuW=0,
consumoseganterior=0;
double pqentuWamW, pqsaluWamW, costousoactual=0;
double consegactinGPRS=0, varcalcost=0, consegantinGPRS=0, costouso=0;

//variavles de lectura
char tiempodesimulacion[100] =
"/root/Escritorio/Archivos/timpo_de_simulacion.txt";
char anchobabdaWiFi[100] = "/root/Escritorio/Archivos/bandwidthWiFi.txt";
```

```

char anchobabdaGPRS[100] = "/root/Escritorio/Archivos/bandwidthgprs.txt";
char NombreArchivoTres [100] =
"/root/Escritorio/Archivos/consumoxpaketewifienuW.txt";
char paquetesentranGPRS[100] =
"/root/Escritorio/Archivos/Bytes_entrada_entradaKbGPRS.txt";
char paquetessalenGPRS[100] =
"/root/Escritorio/Archivos/Bytes_salida_salidaBytesGPRS.txt";
char consumoXpaquetesentranGPRS[100] =
"/root/Escritorio/Archivos/consumo_entrada_conenppqtGPRS_nW.txt";
char consumoXpaquetessalenGPRS[100] =
"/root/Escritorio/Archivos/consumo_salida_consalppqtGPRS_nW.txt";
char bwusuario[100]="/root/Escritorio/Archivos/anchobndausuario.txt";
char
conenusuario[100]="/root/Escritorio/Archivos/consumobateriausuario.txt";
char crusuario[100]="/root/Escritorio/Archivos/costousoredusuario.txt";

char *ip1; //dir IP de primera tecnologia como destino
char *ip2; //dir IP de primera tecnologia como destino

extern int errno;

// FIN BLOQUE DE INICIALIZACION DE VARIABLES GLOBALES

// CALCULO CONSUMO BATERIA EN GPRS

double consumototalGPRSmW(double pqent, double pqsal){

double consumo;

pqentuWamW=pqent/10000;//para tomar un decimal y tomarlo en mW
pqsaluWamW=pqsal/10000;//para tomar un decimal y tomarlo en mW

consumo=pqentuWamW+pqsaluWamW; // consumo de energia total por paquetes
que entran y salen en mW

    if (consumo==consumoseganterior){

        consumoXsegundoGPRS=consumo;

    }else{

        consumoXsegundoGPRS=consumo-consumoseganterior;
        consumoseganterior=consumo;

    }
}

```

```

return (consumoXsegundoGPRS);

}

// FIN CALCULO DE CONSUMO BATERIA EN GPRS

// INICIO FUNCION DE COSTO USO RED GPRS

double costousoredGPRScal(double varcalcost){

    double costusrGPRSKb=15.093;

    if (traspaso == 1){
    if (tiemposim > 3){

        consegactinGPRS = varcalcost - consegantinGPRS;// KiloBytes que
entraron segundo actual

        if (consegactinGPRS==varcalcost){

            costousoactual=1;

        }else{

            costouso = (consegactinGPRS/1000)*costusrGPRSKb;//Costo uso red
GPRS
            histeresis=costouso;//Histeresis
            printf("vho lo que arroja la formula costouso: $%lf\n\n",
costouso);

        }

        consegantinGPRS=varcalcost; //canidad anterior de bytes
transmitidos

    }

    else{
    printf("El interfaz GPRS del nodo movil no se ha enganchado\n\n");

    consegactinGPRS=0;
    costouso=1;
    costousoactual=0;

    }

    }
}

```

```

else{
printf("No se esta generando trafico por la interfaz GPRS\n\n");

consegactinGPRS=0;
costouso=1;
costousoactual=0;

}

return (costouso);

}
// FIN DE LA FUNCION COSTO USO RED

// INICIA LA FUNCION AUXILIAR: EXISTENCIA DE ARCHIVO

int archivo_existe(char *nombre){
    FILE *archivo;
    char nombreArchivo [100];
    strcpy(nombreArchivo,nombre);
    printf("%s\n",nombreArchivo);
    archivo=fopen(nombreArchivo,"r"); //Abre un archivo llamado
nombreArchivo, del tipo "r". Retorna el puntero al archivo.

    if(archivo!=NULL){
        printf("Archivo Existe, y esta abierto\n");
        fclose(archivo);
        printf("Cierro el archivo existente\n");
        return 1;
    }else{
        printf("El archivo no existe\n");
        return 2;
    }
}

// TERMINA LA FUNCION AUXILIAR: EXISTENCIA DE ARCHIVO

// INICIO FUNCION ACCESO A ARCHIVOS SYSTEM COMMAND

int acceso(char *nombre){

// Paso de puntero de nombre de archivo
//har nombreArchivo [100];//crea una variable nombreArchivo de 100 bits
strcpy(nombreArchivo,nombre);//pasa a nombreArchivo lo que hay en nombre

// Bloque de inicializacion

```

```

FILE* archivo;

char cadena [150];
char* token;
int num;
char cadenaToken [20];

// Apertura de archivo
archivo=fopen(nombreArchivo,"r");

//Ciclo de lectura de lineas de archivo y lectura de token
while(feof(archivo)==0 ){
    fscanf(archivo, "%s", cadena);
    token=strtok(cadena," \n\t");
    printf("%s\n",token);
}

//Cierre de archivo
fclose(archivo);

//Copia de token a cadena de caracteres
strcpy(cadenaToken,token);

    //Conversion de cadena de caracteres a entero
    num=atoi(cadenaToken);

// Retorno
return (num);

}

// FIN FUNCION ACCESO A ARCHIVOS SYSTEM COMMAND

// INICIO FUNCION DECISION DE TRASPASO

int decision(double var1, double var2, double var3, double var4, double
var5){

double var4mW=var4/1000000;//consumo total energia red WiFi en W porque
la recibo ne uW
double anchobGPRSMb=var2/1000; //Ancho de banda GPRS en Mb
int costousoredWiFi=1;//porque el costo de uso de red WiFi es cero
int uno=1;

// Ingreso las preferencias de usuario w1: ancho de banda, w2: consumo de
energia, w3: costo uso red.

```

```

    w1=acceso(bwusuario);
    w2=acceso(conenusuario);
    w3=acceso(crusuario);
double constotGPRSW=var3/1000; //Consumo de bateria en GPRS en W;

// Calculo costo de red GPRS
double fcGPRS=w1*log(unob/anchobGPRSMb)+w2*log(constotGPRSW)+w3*log(var5);
    printf("lo que arroja la funcion de costo GPRS: %lf\n",fcGPRS);

// Calculo costo de red WiFi
double fcWiFi=w1*log(unob/var1)+w2*log(var4mW)+w3*log(costousoredWiFi);
    printf("lo que arroja la funcion de costo WiFi: %lf\n",fcWiFi);

// Toma de desicion
if(fcWiFi<fcGPRS){
    traspaso=0; // Trafico sobre red WiFi
}else{
    traspaso=1; // Trafico sobre red GPRS
}
}

// FIN FUNCION DECISION DE TRASPASO

// FUNCION PARA MANEJO DE ERRORES
void DieWithError(char *errorMessage)
{
    perror(errorMessage);
    exit(1);
}
// FIN FUNCION PARA MANEJO DE ERRORES

// Llamando a funcion para manejo de errores
void DieWithError(char *errorMessage);

// INICIO FUNCION DE ENVIO

void envio (char *direccion, char *texto, int puerto, FILE *log){
    int sock; // Descriptor de Socket
    struct sockaddr_in echoServAddr; // Direccion del Servidor de Eco
    struct sockaddr_in fromAddr; // Direccion de la fuente del eco
    unsigned short echoServPort=puerto; //Puerto del Servidor de Eco
    unsigned int fromSize; // Tamaño de las direcciones E/S para recvfrom()
    char *servIP=direccion; // Direccion IP del servidor
    char *echoString=texto; // Cadena para enviar al servidor de eco

```



```

    char echoBuffer[ECHOMAX+1]; // Buffer para recibir la cadena a la que
se hace eco
    int echoStringLen; // Longitud de la cadena para eco
    int respStringLen; // Longitud de la respuesta recibida

    if ((echoStringLen=strlen(echoString))>ECHOMAX)
        DieWithError("Palabra eco muy larga");

    if ((sock=socket(PF_INET,SOCK_DGRAM,IPPROTO_UDP))<0)
        DieWithError("socket() failed");

    // Construye la estructura del direccion del servidor
    memset(&echoServAddr,0,sizeof(echoServAddr));
    echoServAddr.sin_family=AF_INET; // Familia de Direcciones de Internet
    echoServAddr.sin_addr.s_addr=inet_addr(servIP); //Direccion IP del
Servidor
    echoServAddr.sin_port=htons(echoServPort); // Puerto del Servidor

    // Recibe una respuesta
    fromSize=sizeof(fromAddr);
    if ((respStringLen=recvfrom(sock,echoBuffer,ECHOMAX,0,(struct sockaddr
*)&fromAddr,&fromSize))!=echoStringLen)
        DieWithError("recvfrom() failed");

    // null-terminate the received data
    echoBuffer[respStringLen]='\0';
    printf("Recibido en Emisor: %s\n",echoBuffer); // Imprime el arg con
eco
    fprintf(log,"Recibido en Emisor: %s\n",echoBuffer); // Logea la
respuesta del servidor
    fflush(log);

}

// FIN FUNCION DE ENVIO

// INICIO FUNCION PARA REGISTRO DE ENVIO DE PAQUETES
FILE* apertura(char *archivo){

FILE *file;
char dir[512],*envdir;

envdir = getenv("NCTUNS_WORKDIR"); // seÑala a la carpeta .result de la
topologia
    if(envdir)

```

```

        sprintf(dir, "%s/%s", envdir, archivo); // Busca el archivo de
registro
        else
            sprintf(dir, "%s", archivo); // crea el archivo de registro
            file = fopen(dir, "w");
            printf("Log file1: %s\n", dir); // escribe el registro

            return file;
    }

// FIN FUNCION DE REGISTRO DE ENVIO DE PAQUETES

// INICIO FUNCION MAIN

int
main(argc, argv) // Argumentos

char *argv[];
{
    ip1=argv[1]; // IP de primera tecnologia

    ip2=argv[2]; // IP de segunda tecnologia

    FILE *log1,*log2,*log3,*log4; // Crea punteros de archivos de registro

// Registro de envio de paquetes
    log1=apertura("WIFI_INICIAL"); // registro de envio inicial en WiFi
    log2=apertura("GPRS_INICIAL"); // registro de envio inicial en GPRS
    log3=apertura("WIFI_LOG"); // registro de envio en WiFi
    log4=apertura("GPRS_LOG"); // registro de envio en GPRS

    int cont=0;

    unsigned int duracion=1; // Espera un segundo antes de reiniciar ciclo

// Lectura de archivos externos
    entranbytesGPRS=acceso(paquetesentranGPRS); //paquetes que entran al
interfaz GPRS en nodo movil
    salenbytesGPRS=acceso(paquetessalenGPRS); //paquetes que salen del
interfaz GPRS en nodo movil
    anchobandaWiFiKb=acceso(anchobabdaWiFi); //Ancho de babda en WiFi
    anchobandaGPRSKb=acceso(anchobabdaGPRS); //Ancho de babda en GPRS
    conrecepBytesGPRSuW=acceso(consumoXpaquetesentranGPRS); // Consumo por
paquetes que entran nodo movil en GPRS
    contransBytesGPRSuW=acceso(consumoXpaquetessalenGPRS); // Consumo por
paquetes que salen nodo movil en GPRS

```

```

    consumoxpaketewifi=acceso(NombreArchivoTres);//1000; // Consumo total
en WiFi

// Tiempo de actual en simulacion
    tiemposim=acceso(tiemposdesimulacion);
    printf("tiemposim VHO: %lf segundos\n\n",tiemposim);

    double constotGPRSmW=consumototalGPRSmW(conrecepBytesGPRSuW,
contransBytesGPRSuW);// Consumo total en GPRS
    double costousoredGPRS=costousoredGPRScal(entranbytesGPRS);// Costo
uso red GPRS

    consumoWiFiXsegundo=consumoxpaketewifi-
consumoWiFiXsegundoant;//Consumo total bateria en WiFi cada segundo
    consumoWiFiXsegundoant=consumoWiFiXsegundo;

    decision(anchobandaWiFiKb, anchobandaGPRSKb, constotGPRSmW,
consumoWiFiXsegundo, costousoredGPRS); // Decision de traspaso
    printf("Valor Inicial Traspaso: %u\n",traspaso);

// Envio de datos segun desision de traaspaso
    if(traspaso==0){
        envio(ip1,"Tx PRIMERA a WIFI",5001, log1);
    }else{
        envio(ip2,"Tx PRIMERA a GPRS",5002, log2);
    }

// INICIO BUCLE DE EVALUACION CONTINUA
do{

// Tiempo de actual en simulacion
    tiemposim=acceso(tiemposdesimulacion);
    printf("tiemposim VHO: %lf segundos\n\n",tiemposim);

    sleep(duracion); // Espera un segundo

    // Lectura de archivos externos
    entranbytesGPRS=acceso(paquetesentranGPRS); //paquetes que entran al
interfaz GPRS en nodo movil
    salenbytesGPRS=acceso(paquetessalenGPRS);//paquetes que salen del
interfaz GPRS en nodo movil
    anchobandaWiFiKb=acceso(anchobabdaWiFi);//Ancho de babda en WiFi
    anchobandaGPRSKb=acceso(anchobabdaGPRS);//Ancho de babda en GPRS
    conrecepBytesGPRSuW=acceso(consumoXpaquetesentranGPRS);// Consumo por
paquetes que entran nodo movil en GPRS
    contransBytesGPRSuW=acceso(consumoXpaquetessalenGPRS);// Consumo por
paquetes que salen nodo movil en GPRS

```

```

    consumoxpaketewifi=acceso(NombreArchivoTres);//1000; // Consumo total
en WiFi

    consumoWiFiXsegundo=consumoxpaketewifi-
consumoWiFiXsegundoant;//Consumo total bateria en WiFi cada segundo
    consumoWiFiXsegundoant=consumoWiFiXsegundo;

    double constotGPRSmW=consumototalGPRSmW(conrecepBytesGPRSuW,
contransBytesGPRSuW);// Consumo total en GPRS
    double costousoredGPRS=costousoredGPRScal(entranbytesGPRS);// Costo
uso red GPRS

    decision(anchobandaWiFiKb, anchobandaGPRSKb, constotGPRSmW,
consumoWiFiXsegundo, costousoredGPRS); // DEecision de traspaso
    printf("Valor Traspaso: %u\n",traspaso);

// Envio de datos segun desision de traaspaso
    if(traspaso==0){
        envio(ip1,"Tx a WIFI",5001, log3);
    }else{
        envio(ip2,"Tx a GPRS",5002, log4);
    }

}while(1);

return 0;
}
// FIN FUNCION MAIN

```

## Anexo B. Algoritmo en lenguaje C++ de servidor.c

```
// INICO BLOQUE INCLUDE
#include <stdio.h>
#include <sys/socket.h>
#include <arpa/inet.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
// FIN BLOQUE INCLUDE

#define ECHOMAX 255 // Mayor Longitud del eco

void DieWithError (char *errorMessage); // Funcion externa de manejo de
errores

int main (int argc, char *argv[])// Considera argumentos

{
    int sock; // Socket
    struct sockaddr_in echoServAddr; // Direccion Local
    struct sockaddr_in echoClntAddr; // Direccion del Cliente
    unsigned int cliAddrLen; // Longitud del mensaje entrante
    char echoBuffer[ECHOMAX]; // Buffer para la cadena eco
    unsigned short echoServPort; // Puerto del servidor
    int recvMsgSize; // Tamaño del Mensaje Recibido
    FILE *file;// Variable necesaria para log de respuesta
    char dir[512], *envdir; // Variable necesaria para log de respuesta

// Verifica argumento
if (argc != 3)
{
    fprintf(stderr,"Uso: % <UDP SERVER PORT>\n",argv[0]);
    exit(1);
}

echoServPort=atoi(argv[1]); // Primer argumento puerto Local

envdir = getenv("NCTUNS_WORKDIR"); // apertura de archivo de registro
if(envdir)
    sprintf(dir, "%s/%s", envdir, argv[2]);
else
    sprintf(dir, "%s", argv[2]);
file = fopen(dir, "w");
printf("Log file: %s\n", dir);
```

```

// Crea un socket para enviar/recibir datagramas
if ((sock=socket(PF_INET,SOCK_DGRAM,IPPROTO_UDP))<0)
    DieWithError("socket() failed");

// Construye la estructura de la direccion local
memset(&echoServAddr,0,sizeof(echoServAddr)); //Salida de estructura
cero
echoServAddr.sin_family=AF_INET; // Familia de direcciones de internet
echoServAddr.sin_addr.s_addr=htonl(INADDR_ANY); // Cualquier interfaz
entrando
echoServAddr.sin_port=htons(echoServPort); // Puerto Local

// Bind a la direcci3n local
if (bind(sock,(struct sockaddr *)&echoServAddr,sizeof(echoServAddr))<0)
    DieWithError("bind() failed");

for(;;)
{
    // Fija el tama3o del par3metro de Entrada/Salida
    cliAddrLen=sizeof(echoClntAddr);

    // Verifica si recibe un mensaje del cliente
    if ((recvMsgSize=recvfrom(sock,echoBuffer,ECHOMAX,0,(struct sockaddr
*)&echoClntAddr,&cliAddrLen))<0)
        DieWithError("recvfrom() failed");

    echoBuffer[recvMsgSize]='\0'; // terminacion nula del mensaje
    recibido
    printf("Recibido en Nodo Movil: %s\n",echoBuffer); // Registra el
    mensaje recibido en el nodo movil

    fprintf(file,"Recibido en Nodo Movil: %s\n",echoBuffer); // Registra la
    respuesta del servidor
    fflush(file);

    printf("Handling client %s\n",inet_ntoa(echoClntAddr.sin_addr));

    // Env3a de regreso el datagrama recibido al cliente
    if (sendto(sock,echoBuffer,recvMsgSize,0,(struct
sockaddr*)&echoClntAddr,sizeof(echoClntAddr))!=recvMsgSize)
        DieWithError("sendto() envi3 un n3mero diferentes de bytes al
esperado"); // control de tama3o de paquete
}
printf("No alcanzado\n");

```

```
}

// Funcion para control de errores
void DieWithError(char *errorMessage)
{
    perror(errorMessage);
    exit(1);
}
```

## Anexo C. Diagrama de flujo algoritmo de handoff vertical Trabajo de Oscar Wilfredo Jiménez Chavarro

